

Обзорная статья  
УДК 546.302, 547.1  
DOI: 10.31857/S0869769824060061  
EDN: HSSRSE

## Антиобледенительные покрытия: механизм формирования и физико-химические свойства

В. С. Егоркин✉, У. В. Харченко, И. Е. Вялый, М. В. Адигамова,  
И. В. Лукиянчук, С. Л. Синебрюхов, С. В. Гнеденков

*Владимир Сергеевич Егоркин*

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
egorkin@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5489-6832>

*Ульяна Валерьевна Харченко*

кандидат химических наук, научный сотрудник  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
ulyana-kchar@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5166-5609>

*Игорь Евгеньевич Вялый*

кандидат химических наук, научный сотрудник  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
igorvyal@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3806-1709>

*Мария Владимировна Адигамова*

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
adigamova@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0341-9881>

*Ирина Викторовна Лукиянчук*

кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
lukiyanchuk@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1680-4882>

*Сергей Леонидович Синебрюхов*

член-корреспондент РАН, доктор химических наук, заместитель директора  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
sls@ich.dvo.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

*Сергей Васильевич Гнеденков*  
член-корреспондент РАН, доктор химических наук, директор  
Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия  
svg21@hotmail.com  
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

**Аннотация.** В обзоре проведен анализ литературных источников, описывающих методы и подходы к созданию антиобледенительных покрытий, а также проблемы разработки и применения новых антиобледенительных материалов и покрытий. Приведены существующие работы, представляющие результаты исследования характеристик супергидрофобных/антиобледенительных покрытий на поверхности металлов и сплавов, обработанных методом плазменного электролитического оксидирования.

**Ключевые слова:** антиобледенительные покрытия, гидрофобность, смачиваемость, защитные покрытия, композиционные покрытия, плазменное электролитическое оксидирование, коррозия, гетерооксидные структуры

**Для цитирования:** Егоркин В.С., Харченко У.В., Вялый И.Е., Адигамова М.В., Лукиянчук И.В., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Антиобледенительные покрытия: механизм формирования и физико-химические свойства // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 6. С. 73–86. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060061>

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии ДВО РАН (проект N FWFN (0205)-2022-0001).

Review article

## Physico-chemical aspects and the mechanism of formation of anti-icing coatings for aircraft structures

V. S. Egorkin, U. V. Kharchenko, I. E. Vyalyi, M. V. Adigamova,  
I. V. Lukiyanchuk, S. L. Sinebryukhov, S. V. Gnedenkov

*Vladimir S. Egorkin*  
Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
egorkin@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5489-6832>

*Uliana V. Kharchenko*  
Candidate of Sciences in Chemistry, Researcher  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
ulyana-kchar@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-5166-5609>

*Igor E. Vyalyi*  
Candidate of Sciences in Chemistry, Researcher  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
igorvyal@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-3806-1709>

*Maria V. Adigamova*  
Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
adigamova@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0341-9881>

*Irina V. Lukyanchuk*

Candidate of Sciences in Chemistry, Senior Researcher  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
lukiyanchuk@ich.dvo.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1680-4882>

*Sergey L. Sinebryukhov*

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry, Deputy Director  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
sls@ich.dvo.ru  
<http://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

*Sergey V. Gnedenkov*

Corresponding Member of RAS, Doctor of Sciences in Chemistry, Director  
Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
svg21@hotmail.com  
<http://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

**Abstract.** The review analyzes literature sources describing methods and approaches to the creation of anti-icing coatings, as well as the problems of development and application of new anti-icing materials and coatings. The existing works presenting the results of research into the characteristics of superhydrophobic/anti-icing coatings on the surface of metals and alloys treated by plasma electrolytic oxidation are presented.

**Keywords:** anti-icing coatings, hydrophobicity, wettability, protective coatings, composite coatings, plasma electrolytic oxidation, corrosion, oxide heterostructures

**For citation:** Egorkin V.S., Kharchenko U.V., Vyalyi I.E., Adigamova M.V., Lukiyanchuk I.V., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Physico-chemical aspects and the mechanism of formation of anti-icing coatings for aircraft structures. *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(6):73–86. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824060061>

## Введение

Интенсификация исследований, направленных на создание функциональных материалов, обладающих антиобледенительными свойствами, обусловлена как общими негативными последствиями, вызываемыми обледенением летательного аппарата, так и ужесточением требований, предъявляемым к степени и характеру обледенения специальных материалов и покрытий [1]. В то же время следует отметить, что существующие покрытия подвержены обледенению в значительной степени.

Обледенение в полете – серьезная опасность. Оно изменяет аэродинамику воздушного судна, увеличивает сопротивление, ухудшает контроль и снижает подъемную силу. Фактическая масса льда на самолете является вторичной (менее значимой проблемой) по отношению к нарушению воздушного потока, которое обледенение вызывает. По мере добавления мощности для компенсации дополнительного сопротивления и подъема носа для поддержания высоты угол атаки увеличивается, что приводит к дополнительному образованию льда на нижней части крыльев и фюзеляжа. Лед накапливается на каждой открытой фронтальной поверхности самолета – не только на крыльях, винтах и ветровом стекле, но также на антеннах, вентиляционных отверстиях, воздухозаборниках и др. Срыв льда, попавшего в двигатель, приводит к катастрофическим последствиям.

На обледенение летательных аппаратов оказывает влияние ряд факторов, основными из которых являются температура и относительная влажность воздуха, водность облаков, средний диаметр капель, скорость и высота полета летательного аппарата. Метеорологические условия, способствующие обледенению, характеризуются наличием переохлажденных капель воды или кристаллов льда, взвешенных в воздухе в виде облаков, тумана, дождя, мокрого снега и т.п. Летательный аппарат выводит содержащиеся в обтекаемом потоке воздуха переохлажденные капли воды из неустойчивого равновесия, и последние замерзают на его поверхностях.

Различают следующие виды льдообразований: прозрачный лед в виде стекловидной пленки с гладкой поверхностью; малопрозрачный лед шероховатой, зернистой или кристаллической структуры; кристаллический лед (иней); смешанные виды льдообразований, из которых наибольшую опасность представляют ледяные наросты неправильной формы, образующиеся при полете в зоне выпадения дождя и снега. Обледенение – нестационарный процесс, возникающий при входе летательного аппарата в облака с мельчайшими каплями переохлажденной воды, находящейся в метастабильном состоянии при отрицательных температурах, а для воздухозаборников авиационных двигателей – даже при положительных. Механизм быстрой кристаллизации переохлажденных капель при ударе их о поверхность конструкции летательного аппарата пока еще недостаточно изучен и связан с совокупностью проблем из различных областей науки и техники: физики, метеорологии, аэродинамики, термодинамики, конструирования и эксплуатации воздушных судов.

Целью данного обзора является анализ литературных источников, описывающих методы и подходы к созданию антиобледенительных покрытий, а также проблемы разработки и применения новых антиобледенительных материалов и покрытий.

### **Методы и подходы к созданию антиобледенительных покрытий**

В целях защиты летательных аппаратов от обледенения применяются различные антиобледенительные системы, для работы которых необходимы достаточно большие энергозатраты. Принцип действия большинства этих систем – увеличение температуры защищаемых поверхностей до положительной [2]. Исполнительные элементы антиобледенительных систем расположены в местах наиболее вероятного и интенсивного образования льда, а также в местах, требующих особого внимания с точки зрения безопасности полета. Это передние кромки крыла и хвостового оперения, воздухозаборники двигателей, а также некоторые датчики. Антиобледенительные системы могут быть постоянного действия и циклические. Системы постоянного действия не допускают образования льда на защищаемых поверхностях. Они применяются в местах, где скопившийся, а затем удаленный лед может попасть в двигатель и тем самым нарушить его нормальную работу. Системы циклического действия периодически сбрасывают образующийся на защищаемых поверхностях слой льда за счет уменьшения сцепления льда с поверхностью. Следует отметить, что в ряде случаев применение антиобледенительных систем (при использовании теплового воздействия на слой льда) приводит к тому, что возникают капли и ручейки, мигрирующие вниз по потоку и создающие новую наледь (барьерный лед). Образование барьерного льда на нижней поверхности предкрылка увеличивает аэродинамическое сопротивление летательного аппарата и, соответственно, расход топлива, а его скопление у лопасти несущего винта вертолета ведет к повышению вибраций. Барьерный лед на внутренней поверхности воздухозаборника авиационного двигателя приводит к его повреждению, что повышает затраты на ремонт. Отмеченные явления свидетельствуют о том, что требуется создание гибридных систем, представляющих собой комбинацию традиционных антиобледенительных систем с нанесением антиобледенительных покрытий [2–24].

Антиобледенительные поверхности в наиболее общем смысле – это поверхности, которые благодаря своим физико-химическим свойствам способствуют уменьшению накопления льда и снега на поверхностях, регулярно подвергающихся атмосферным осадкам при температурах, обуславливающих их замерзание. Супергидрофобные покрытия на защищаемых материалах во многих случаях демонстрируют антиобледенительные свойства, обусловленные низкой адгезией со льдом/снегом, водоотталкивающими свойствами и повышенной стабильностью переохлажденного состояния капель воды. Ключевыми факторами, сдерживающими до настоящего времени заметное практическое применение супергидрофобных покрытий, являются резкое снижение антиобледенительных свойств, связанное со слабой механической стабильностью многомодальной шероховатости и высокой чувствительностью к износу, а также с хрупкостью текстуры поверхности; удаление слоя, обладающего низкой поверхностной энергией, водными осадками; низкая коррозионная стойкость материала основы [25]. Это обуславливает актуальность поиска новых материалов и методов

формирования покрытий, позволяющих преодолеть такие барьеры и создать надежные антиобледенительные слои.

Подходы к созданию антиобледенительных покрытий могут быть разделены на три направления: 1) увеличение времени задержки замерзания капель воды, 2) предотвращение образования изморози и 3) снижение прочности сцепления льда с поверхностью. Антиобледенительные свойства поверхности и гидрофобность тесно связаны, многие гидрофобные/супергидрофобные покрытия, получаемые различными методами обработки поверхности, обладают антиобледенительными свойствами [2]. Супергидрофобные поверхности (т.е. поверхности, характеризующиеся большим значением контактного угла (КУ), малым гистерезисом КУ, углом скатывания менее  $10^\circ$ ) способны удерживать прослойку воздуха между водой и структурными элементами, образующими рельеф поверхности, и демонстрируют многообещающие антиобледенительные характеристики [11, 26–28]. Отмечается, что супергидрофобные поверхности усиливают отскок падающих капель жидкости при низких температурах подложки и высоких значениях относительной влажности [29]. Кроме того, такие покрытия обеспечивают снижение величины нормальной и/или сдвиговой прочности адгезии льда к подложке, задержку замерзания воды на поверхностях и снижают или даже полностью предотвращают образование зародышей и накопление льда и/или снега на обработанных поверхностях [28, 30–32].

Варианты механизма, обуславливающего антиобледенительные свойства [19, 25, 33–39] следующие:

- 1) самопроизвольное удаление капель жидкости с супергидрофобной поверхности, препятствующее образованию слоя замерзшей воды;
- 2) задержка кристаллизации капель воды, контактирующих с супергидрофобной поверхностью, из-за повышенного барьера для фазового перехода переохлажденная вода/лед и более длительный временной интервал для гетерогенного зародышеобразования;
- 3) низкая адгезия льда и снега к поверхности супергидрофобного покрытия, приводящая к уменьшению накопления инея, снега и льда;
- 4) уменьшенный теплообмен между более теплой каплей и более холодной поверхностью, снижающий вероятность замерзания ударяющихся о поверхность падающих капель;
- 5) сдвиг тройной точки в сторону отрицательных температур в пограничных слоях воды, прилегающих к супергидрофобной поверхности, что вызывает снижение адгезии льда и облегчает его удаление.

Для придания поверхности антиобледенительных свойств используются следующие подходы [33, 37, 40, 41]: а) применение гидрофобных материалов без текстурирования поверхности; б) применение гидрофильных материалов с наноструктурированной поверхностью, позволяющей добиться гидрофобных и супергидрофобных состояний; в) комбинирование первых двух подходов с обработкой структурированных гидрофильных субстратов гидрофобными агентами (в том числе содержащими наночастицы), позволяющими снизить поверхностную энергию и добиться формирования многомодального рельефа поверхности и, следовательно, устойчивого супергидрофобного состояния.

Направленное текстурирование поверхностного слоя позволяет управлять явлениями, служащими причинами образования льда, а следовательно, прогнозировать поведение покрытия в реальных условиях [2, 29, 31, 40–45]. Антиобледенительные покрытия, обладающие гидрофобными и супергидрофобными свойствами, могут быть:

– неструктурированными (снижают адгезию льда, мало подвержены повреждению при сдвиге масс льда с поверхности, снижают скорость конденсационной нуклеации); их недостатком является то, что лед неизбежно нарастает, для освобождения поверхности необходимо прикладывать внешние воздействия;

– текстурированными, т.е. обладать одноуровневой нано- или микротекстурой (сопротивляются проникновению влаги к подложке за счет образования квазижидких слоев, могут обладать невысокой температурой зародышеобразования и характеризоваться несмачиваемым состоянием во время конденсации); недостаток данного типа – невозможность контролировать конденсацию и возможное повреждение при сдвиге льда;

– структурированными с многоуровневой иерархической структурой, а именно: микроуровневой (позволяет снизить адгезию капли), микро + наноуровневой (сопротивление

проникновению капли жидкости к подложке во время динамического воздействия, низкая температура нуклеации, малое время контакта капли); недостатком таких покрытий является возможность механических повреждений.

Помимо перечисленных методов формирования супергидрофобных поверхностей ученые предлагают и принципиально новый подход к созданию антиобледенительных покрытий – пропитка структурированной поверхности слоем смазки (лубриканта), который образует SLIP (liquid-infused porous surfaces) – тонкую, гладкую пленку, отталкивающую воду, а также SLWL-поверхности (self-lubricating liquid waterlayer). Однако эти покрытия обладают своими недостатками, например унос лубриканта в циклах «замораживание ⇌ оттаивание». Принимая во внимание, что один из возможных механизмов механического повреждения текстуры супергидрофобных покрытий при эксплуатации в условиях низких температур может быть связан с напряжениями, вызываемыми замерзанием воды, когда избыточное давление в зоне трехфазного контакта может достигать существенных значений, необходимо исследовать антиобледенительные свойства как гидрофобных, так и супергидрофобных покрытий. Фторсиланы, используемые для формирования супергидрофобных слоев, характеризующихся в том числе антиобледенительными свойствами, на этапе создания защитного слоя зачастую являются высокотоксичными. Традиционные фторполимеры, присутствующие на рынке, благодаря своей низкой поверхностной энергии обладают невысокой адгезией к обрабатываемой поверхности, что ограничивает возможность их более широкого применения.

### **Супергидрофобные/антиобледенительные покрытия на поверхности металлов и сплавов, обработанных методом плазменного электролитического оксидирования**

Результаты исследования физико-химических, механических свойств защитных покрытий, обладающих в том числе гидрофобными и супергидрофобными свойствами, свидетельствуют о том, что одним из ключевых факторов в обеспечении надежной длительной защиты материала является покрытие-матрица (или базовый слой), на котором формируется гидрофобный слой [46–48]. В случае возможного возникновения дефектов различной этимологии в гидрофобном (поверхностном) слое оно обеспечивает надежный барьер, предотвращающий механическое повреждение защищаемого материала. Как показала практика, в качестве такого покрытия-матрицы может успешно выступать оксидная гетероструктура, формируемая методом плазменного электролитического оксидирования, на поверхности и в поры которой наносятся гидрофобный агент или компоненты, из которых будет составлен гидрофобный или супергидрофобный слой.

Существует достаточно много исследований, посвященных созданию супергидрофобных/антиобледенительных покрытий на поверхности металлов и сплавов, обработанных методом плазменного электролитического оксидирования (результаты включают также поиск по покрытиям, получаемым методом микродугового оксидирования) [24–57]. Следует отметить, что базовые слои формировали в различных электролитах, что обеспечивало отличающиеся друг от друга уровни коррозионной и механической стойкости. Данным методом обрабатывают поверхность сплавов магния [49–62], циркония [63, 64], низкоуглеродистой стали [65], сплавов алюминия [66–69], сплавов титана [70–76]. Характеристики формируемых базовых слоев позволяют существенным образом улучшить механические характеристики, снизить ток коррозии вплоть до трех порядков величины по сравнению с незащищенным металлом, а дополнительная гидрофобизация образца позволяет снизить данный параметр еще на четыре порядка [67], что наряду с высокими значениями контактного угла значительно повышает коррозионную защиту, обеспечиваемую данными покрытиями. Вместе с тем, несмотря на огромный интерес, проявляемый к этой тематике [77], на сегодняшний день опубликовано только две работы, в которых исследованы антиобледенительные свойства покрытий, формируемых на базе ПЭО-слоев [68, 73]. С учетом продемонстрированных высоких антиобледенительных характеристик можно утверждать, что данный тип покрытий обладает значительным потенциалом.

## Заключение

Антиобледенительные материалы и покрытия, устойчивые к механическим повреждениям и деградации вследствие негативного воздействия окружающей среды, крайне востребованы с практической точки зрения. В имеющихся исследованиях разрабатываемые покрытия демонстрируют разную степень сохранения антиобледенительных характеристик после механических или атмосферных испытаний. Вместе с тем помимо имеющихся трудностей с применяемыми материалами одной из нерешенных проблем с сообщаемыми оценками льдофобных характеристик, включая устойчивость к механическим и атмосферным повреждениям, является отсутствие общепринятых стандартов испытаний, что затрудняет сравнение приводимых результатов. Например, исследования показали, что температура замерзания обводненного потока или капель тестовой жидкости зависит от чистоты воды, размера капель воды, способа охлаждения и скорости охлаждения. Как отмечается многими исследователями, стандартизация методов проведения испытаний антиобледенительных свойств крайне необходима. Касательно же возможности придания антиобледенительных свойств покрытиям, формируемым методом плазменного электролитического окислирования, нет сомнения, что эти работы получат свое дальнейшее развитие, в том числе с применением новых фторполимерных материалов, обладающих низкой поверхностной энергией.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Aircraft icing handbook. Lower Hutt: Civil Aviation Authority, 2000. 108 p.
2. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V., Budinger M., Bonaccorso E., Villedieu P., Bennani L. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications // *Prog. Aerosp. Sci.* 2019. Vol. 105. P. 74–97.
3. Zhang C., Liu H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing // *Physics of Fluids*. 2016. Vol. 28, N 6.
4. Fortin G. Super-Hydrophobic Coatings as a Part of the Aircraft Ice Protection System // *Engineering, Materials Science, Environmental Science*. 2017. DOI: 10.4271/2017-01-2139.
5. Yeong Y.H., Sokhey J., Loth E. Ice Adhesion on Superhydrophobic Coatings in an Icing Wind Tunnel // *Contamination Mitigating Polymeric Coatings for Extreme Environments*. 2018. P. 99–121.
6. Kulinich S.A., Farzaneh M. On ice-releasing properties of rough hydrophobic coatings // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65, N 1. P. 60–64.
7. Kulinich S.A., Farhadi S., Nose K., Du X.W. Superhydrophobic Surfaces: Are They Really Ice-Repellent? // *Langmuir*. 2011. Vol. 27, N 1. P. 25–29.
8. Susoff M., Siegmann K., Pfaffenroth C., Hirayama M. Evaluation of icephobic coatings – Screening of different coatings and influence of roughness // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 282. P. 870–879.
9. Chen J., Liu J., He M., Li K., Cui D., Zhang Q., Zeng X., Zhang Y., Wang J. et al. Superhydrophobic surfaces cannot reduce ice adhesion // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 101, N 11.
10. Momen G., Jafari R., Farzaneh M. Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 349. P. 211–218.
11. Hejazi V., Sobolev K., Nosonovsky M. From superhydrophobicity to icephobicity: forces and interaction analysis // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3, N 1. P. 2194.
12. Nosonovsky M., Hejazi V. Why Superhydrophobic Surfaces Are Not Always Icephobic // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6, N 10. P. 8488–8491.
13. Lian Y., Guo Y. Investigation of the Splashing Phenomenon of Large Droplets for Aviation Safety // *SAE Technical Paper*. 2015. P. 11. DOI: 10.4271/2015-01-2100.
14. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65, N 1. P. 88–96.
15. Kraj A.G., Bibeau E.L. Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation // *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35, N 5. P. 966–972.
16. Mingione G., Barocco M., Denti E. et al. *Flight in Icing Conditions*. 2008.
17. Scavuzzo R.J., Chu M.L. *Structural Properties of Impact Ices Accreted on Aircraft Structures*. 1987.

18. Amendola A., Mingione G. On the problem of icing for modern civil aircraft // *Air & Space Europe*. 2001. Vol. 3, N 3/4. P. 214–217.
19. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D., McKinley G.H., Gleason K.K. Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2016. Vol. 12, N 7. P. 1938–1963.
20. Nishimoto S., Bhushan B. Bioinspired self-cleaning surfaces with superhydrophobicity, superoleophobicity, and superhydrophilicity // *RSC Adv*. 2013. Vol. 3. P. 671–690.
21. Varanasi K.K., Deng T., Hsu M.F., Bhate N. Design of Superhydrophobic Surfaces for Optimum Roll-Off and Droplet Impact Resistance // *Nano-Manufacturing Technology; and Micro and Nano Systems*. Vol. 13, pt. A, B. ASMEDC, 2008. P. 637–645.
22. Varanasi K.K., Deng T., Smith J.D., Hsu M., Bhate N. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 97, N 23.
23. Stone H.A. Ice-Phobic Surfaces That Are Wet // *ACS Nano*. 2012. Vol. 6, N 8. P. 6536–6540.
24. Makkonen L. Ice Adhesion –Theory, Measurements and Countermeasures // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2012. Vol. 26, N 4/5. P. 413–445.
25. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Modin E.B. Modus Operandi of Protective and Anti-icing Mechanisms Underlying the Design of Longstanding Outdoor Icephobic Coatings // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13, N 4. P. 4335–4346.
26. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D., McKinley G.H., Gleason K.K., Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces // *Soft Matter*. 2016. Vol. 12, N 7. P. 1927–2232.
27. Kulinich S.A., Farzaneh M. How Wetting Hysteresis Influences Ice Adhesion Strength on Superhydrophobic Surfaces // *Langmuir*. 2009. Vol. 25, N 16. P. 8854–8856.
28. Sarkar D.K., Farzaneh M. Superhydrophobic Coatings with Reduced Ice Adhesion // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2009. Vol. 23, N 9. P. 1215–1237.
29. Mishchenko L., Hatton B., Bahadur V., Taylor J.A., Krupenkin T., Aizenberg J. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4, N 12. P. 7699–7707.
30. Tourkine P., Le Merrer M., Quéré D. Delayed Freezing on Water Repellent Materials // *Langmuir*. 2009. Vol. 25, N 13. P. 7214–7216.
31. Alizadeh A., Yamada M., Li R., Shang W., Otta S., Zhong S., Ge L., Dhinojwala A., Conway K.R. et al. Dynamics of Ice Nucleation on Water Repellent Surfaces // *Langmuir*. 2012. Vol. 28, N 6. P. 3180–3186.
32. Saito H., Takai K., Ymauchi G. A Study On Ice Adhesiveness To Water-Repellent Coating // *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 1997. Vol. 46, N 9 Appendix. P. 185–189.
33. Schutzius T.M., Jung S., Maitra T., Eberle P., Antonini C., Stamatopoulos C., Poulikakos D. Physics of Icing and Rational Design of Surfaces with Extraordinary Icephobicity // *Langmuir*. 2015. Vol. 31, N 17. P. 4807–4821.
34. Kreder M.J., Alvarenga J., Kim P., Aizenberg J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? // *Nature Reviews Materials*. 2016. Vol. 1, N 1. P. 15003.
35. Lv J., Song Y., Jiang L., Wang J. Bio-Inspired Strategies for Anti-Icing // *ACS Nano*. 2014. Vol. 8, N 4. P. 3152–3169.
36. Golovin K., Tuteja A. A predictive framework for the design and fabrication of icephobic polymers // *Science Advances*. 2017. Vol. 3, N 9.
37. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Anti-icing Potential of Superhydrophobic Coatings // *Mendelevov Communications*. 2013. Vol. 23, N 1. P. 3–10.
38. Sharifi N., Dolatabadi A., Pugh M., Moreau C. Anti-icing performance and durability of suspension plasma sprayed TiO<sub>2</sub> coatings // *Cold Regions Science and Technology*. 2019. Vol. 159. P. 1–12.
39. Boinovich L., Emelyanenko A.M., Korolev V.V., Pashinin A.S. Effect of Wettability on Sessile Drop Freezing: When Superhydrophobicity Stimulates an Extreme Freezing Delay // *Langmuir*. 2014. Vol. 30, N 6. P. 1659–1668.
40. Antonini C., Villa F., Bernagozzi I., Amirfazli A., Marengo M. Drop Rebound after Impact: The Role of the Receding Contact Angle // *Langmuir*. 2013. Vol. 29, N 52. P. 16045–16050.
41. Maitra T., Tiwari M.K., Antonini C., Schoch P., Jung S., Eberle P., Poulikakos D. On the Nanoengineering of Superhydrophobic and Impalement Resistant Surface Textures below the Freezing Temperature // *Nano Letters*. 2014. Vol. 14, N 1. P. 172–182.

42. Tiwari M.K., Bayer I.S., Jursich G.M., Schutzius T.M., Megaridis C.M. Highly Liquid-Repellent, Large-Area, Nanostructured Poly(vinylidene fluoride)/Poly(ethyl 2-cyanoacrylate) Composite Coatings: Particle Filler Effects // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2010. Vol. 2, N 4. P. 1114–1119.
43. Wong T.-S., Kang S.H., Tang S.K.Y., Smythe E.J., Hatton B.D., Grinthal A., Aizenberg J. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity // *Nature*. 2011. Vol. 477. P. 443–447.
44. Wilson P.W., Lu W., Xu H., Kim P., Kreder M.J., Alvarenga J., Aizenberg J. Inhibition of ice nucleation by slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013. Vol. 15, N 2. P. 581–585.
45. Zhang Y.-L., Xia H., Kim E., Sun H.-B. Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties // *Soft Matter*. 2012. Vol. 8, N 44. P. 11217.
46. Egorin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyalii I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 334. P. 29–42.
47. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorin V.S., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S. Composite polymer-containing protective coatings on magnesium alloy MA8 // *Corrosion Science*. 2014. Vol. 85. P. 52–59.
48. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Zavidnaya A.G., Egorin V.S., Puz' A.V., Mashtalyar D.V., Sergienko V.I., Yerokhin A.L., Matthews A. Composite hydroxyapatite-PTFE coatings on Mg-Mn-Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based route // *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2014. Vol. 45, N 6. P. 3104–3109.
49. Joo J., Kim D., Moon H.-S., Kim K., Lee J. Durable anti-corrosive oil-impregnated porous surface of magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation with hydrothermal treatment // *Applied Surface Science*. 2020. Vol. 509. P. 145361.
50. Al Zoubi W., Kim M.J., Kim Y.G., Ko Y.G. Fabrication of graphene oxide/8-hydroxyquinolin/inorganic coating on the magnesium surface for extraordinary corrosion protection // *Progress in Organic Coatings*. 2019. Vol. 137. P. 105314.
51. Liu A., Xu J. Preparation and corrosion resistance of superhydrophobic coatings on AZ31 magnesium alloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018. Vol. 28, N 11. P. 2287–2293.
52. Zhang Q., Zhang H. Corrosion resistance and mechanism of micro-nano structure super-hydrophobic surface prepared by laser etching combined with coating process // *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2019. Vol. 66, N 3. P. 264–273.
53. Wang Z., Zhang J., Li Y., Bai L. et al. Enhanced corrosion resistance of micro-arc oxidation coated magnesium alloy by superhydrophobic Mg–Al layered double hydroxide coating // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019. Vol. 29, N 10. P. 2066–2077.
54. Zhang S., Cao D., Xu L., Lin Z., Meng R. Fabrication of a Superhydrophobic Polypropylene Coating on Magnesium Alloy with Improved Corrosion Resistance // *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15, N 1. P. 177–187.
55. Wu Y., Wang Y., Liu H., Liu Y., Guo L., Jia D., Ouyang J., Zhou Y. The fabrication and hydrophobic property of micro-nano patterned surface on magnesium alloy using combined sparking sculpture and etching route // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 389. P. 80–87.
56. Jiang D., Xia X., Hou J., Cai G., Zhang X., Dong Z. A novel coating system with self-reparable slippery surface and active corrosion inhibition for reliable protection of Mg alloy // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 373. P. 285–297.
57. Jiang D., Zhou H., Wan S., Cai G.-Y., Dong Z.-H. Fabrication of superhydrophobic coating on magnesium alloy with improved corrosion resistance by combining micro-arc oxidation and cyclic assembly // *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 339. P. 155–166.
58. Zhang Y., Feyerabend F., Tang S., Hu J., Lu X., Blawert C., Lin T. A study of degradation resistance and cytocompatibility of super-hydrophobic coating on magnesium // *Materials Science and Engineering: C*. 2017. Vol. 78. P. 405–412.
59. Cui X., Lin X., Liu C., Yang R., Zheng X., Gong M. Fabrication and corrosion resistance of a hydrophobic micro-arc oxidation coating on AZ31 Mg alloy // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 90. P. 402–412.
60. Gnedenkov S.V., Egorin V.S., Sinebryukhov S.L., Vyalii I.E., Pashinin A.S., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Formation and electrochemical properties of the superhydrophobic nanocomposite coating on PEO pretreated Mg-Mn-Ce magnesium alloy // *Surf. Coat. Technol.* 2013. Vol. 232. P. 240–246.

61. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Pashinin A.S., Gnedenkov S.V., Egorkin V.S., Sinebryukhov S.L. Mg alloy treatment for superhydrophobic anticorrosion coating formation // *Surface Innovations*. 2013. Vol. 1, N 3. P. 162–172.
62. Li J., Wang C., Sun H., Li X. Preparation of Superhydrophobic Magnesium Alloy Surface via Fabrication of Micro/Nano Binary Structure and Modification with Perfluoropolysilane // *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 2018. Vol. 10, N 2. P. 291–296.
63. Arun S., Sooraj P.N., Hariprasad S., Arunnellaiappan T., Rameshbabu N. Fabrication of superhydrophobic coating on PEO treated zirconium samples and its corrosion resistance // *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 2056–2060.
64. Aktug S.L., Durdu S., Aktas S., Yalcin E., Usta M. Characterization and investigation of in vitro properties of antibacterial copper deposited on bioactive ZrO<sub>2</sub> coatings on zirconium // *Thin Solid Films*. 2019. Vol. 681. P. 69–77.
65. Boinovich L.B., Gnedenkov S.V., Alpysbaeva D.A., Egorkin V.S., Emelyanenko A.M., Sinebryukhov S.L., Zaretskaya A.K. Corrosion resistance of composite coatings on low-carbon steel containing hydrophobic and superhydrophobic layers in combination with oxide sublayers // *Corrosion Science*. 2012. Vol. 55. P. 238–245.
66. Fu J., Sun Y., Ji Y., Zhang J. Fabrication of robust ceramic based superhydrophobic coating on aluminum substrate via plasma electrolytic oxidation and chemical vapor deposition methods // *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. Vol. 306. P. 117641.
67. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Vyalii I.E. Wettability and electrochemical properties of the highly hydrophobic coatings on PEO-pretreated aluminum alloy // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 307. P. 1241–1248.
68. Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov A.S., Filonina V.S., Vyalii I.E., Nadaraia K.V., Imshinetskiy I.M., Belov E.A., Izotov N.V. et al. Icephobic Performance of Combined Fluorine-Containing Composite Layers on Al-Mg-Mn-Si Alloy Surface // *Polymers*. 2021. Vol. 13, N 21. P. 3827.
69. Zou Y., Wang Y., Xu S., Jin T., Wei D., Ouyang J., Jia D., Zhou Y. Superhydrophobic double-layer coating for efficient heat dissipation and corrosion protection // *Chem. Eng. J.* 2019. Vol. 362. P. 638–649.
70. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Electrochemical properties of the superhydrophobic coatings on metals and alloys // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014. Vol. 45, N 6. P. 3075–3080.
71. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Emelyanenko A.M., Alpysbaeva D.A., Boinovich L.B. Features of the occurrence of electrochemical processes in contact of sodium chloride solutions with the surface of superhydrophobic coatings on titanium // *Russ. J. Electrochem+*. 2012. Vol. 48, N 3. P. 336–345.
72. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Alpysbaeva D.A., Boinovich L.B. Wetting and electrochemical properties of hydrophobic and superhydrophobic coatings on titanium // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011. Vol. 383, N 1/3. P. 61–66.
73. Belov E.A., Nadaraia K.V., Mashtalyar D.V., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Anti-icing composite fluoropolymer coatings on titanium // *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2022. Vol. 15, N 3.1. P. 204–209.
74. Jiang J.Y., Xu J.L., Liu Z.H., Deng L., Sun B., Liu S.D., Wang L., Liu H.Y. Preparation, corrosion resistance and hemocompatibility of the superhydrophobic TiO<sub>2</sub> coatings on biomedical Ti-6Al-4V alloys // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 347. P. 591–595.
75. Chen G., Wang Y., Zou Y., Jia D., Zhou Y. A fractal-patterned coating on titanium alloy for stable passive heat dissipation and robust superhydrophobicity // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 374. P. 231–241.
76. Wang S., Wang Y., Zou Y., Wu Y., Chen G., Ouyang J., Jia D., Zhou Y. A self-adjusting PTFE/TiO<sub>2</sub> hydrophobic double-layer coating for corrosion resistance and electrical insulation // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 402. P. 126116.
77. Shen Y., Wu X., Tao J., Zhu C., Lai Y., Chen Z. Icephobic materials: Fundamentals, performance evaluation, and applications // *Progress in Materials Science*. 2019. Vol. 103. P. 509–557.

## REFERENCES

1. Aircraft icing handbook. Lower Hutt: Civil Aviation Authority; 2000. 108 p.
2. Huang X., Tepylo N., Pommier-Budinger V., Budinger M., Bonaccorso E., Villedieu P., Bennani L. A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. *Prog. Aerosp. Sci.* 2019;105:74–97.
3. Zhang C., Liu H. Effect of drop size on the impact thermodynamics for supercooled large droplet in aircraft icing. *Physics of Fluids*. 2016;28(6).
4. Fortin G. Super-Hydrophobic Coatings as a Part of the Aircraft Ice Protection System. *Engineering, Materials Science, Environmental Science*. 2017. DOI: 10.4271/2017-01-2139.
5. Yeong Y.H., Sokhey J., Loth E. Ice Adhesion on Superhydrophobic Coatings in an Icing Wind Tunnel. *Contamination Mitigating Polymeric Coatings for Extreme Environments*. 2018:99–121.
6. Kulinich S.A., Farzaneh M. On ice-releasing properties of rough hydrophobic coatings. *Cold Regions Science and Technology*. 2011; 65(1):60–64.
7. Kulinich S.A., Farhadi S., Nose K., Du X.W. Superhydrophobic Surfaces: Are They Really Ice-Repellent? *Langmuir*. 2011;27(1):25–29.
8. Susoff M., Siegmann K., Pfaffenroth C., Hirayama M. Evaluation of icephobic coatings – Screening of different coatings and influence of roughness. *Applied Surface Science*. 2013;282:870–879.
9. Chen J., Liu J., He M., Li K., Cui D., Zhang Q., Zeng X., Zhang Y., Wang J. et al. Superhydrophobic surfaces cannot reduce ice adhesion. *Applied Physics Letters*. 2012;101(11).
10. Momen G., Jafari R., Farzaneh M. Ice repellency behaviour of superhydrophobic surfaces: Effects of atmospheric icing conditions and surface roughness. *Applied Surface Science*. 2015;349:211–218.
11. Hejazi V., Sobolev K., Nosonovsky M. From superhydrophobicity to icephobicity: forces and interaction analysis. *Scientific Reports*. 2013;3(1):2194.
12. Nosonovsky M., Hejazi V. Why Superhydrophobic Surfaces Are Not Always Icephobic. *ACS Nano*. 2012;6(10):8488–8491.
13. Lian Y., Guo Y. Investigation of the Splashing Phenomenon of Large Droplets for Aviation Safety. *SAE Technical Paper*. 2015:11. DOI: 10.4271/2015-01-2100.
14. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review. *Cold Regions Science and Technology*. 2011;65(1):88–96.
15. Kraj A.G., Bibeau E.L. Phases of icing on wind turbine blades characterized by ice accumulation. *Renewable Energy*. 2010;35(5):966–972.
16. Mingione G., Barocco M., Denti E. et al. Flight in Icing Conditions. 2008.
17. Scavuzzo R.J., Chu M.L. Structural Properties of Impact Ices Accreted on Aircraft Structures. 1987.
18. Amendola A., Mingione G. On the problem of icing for modern civil aircraft. *Air & Space Europe*. 2001;3(3/4):214–217.
19. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D., McKinley G.H., Gleason K.K. Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2016;12(7):1938–1963.
20. Nishimoto S., Bhushan B. Bioinspired self-cleaning surfaces with superhydrophobicity, superoleophobicity, and superhydrophilicity. *RSC Adv*. 2013;3:671–690.
21. Varanasi K.K., Deng T., Hsu M.F., Bhate N. Design of Superhydrophobic Surfaces for Optimum Roll-Off and Droplet Impact Resistance. In: *Nano-Manufacturing Technology; and Micro and Nano Systems*. Vol. 13, parts A, B. ASME/EDC; 2008. P. 637–645.
22. Varanasi K.K., Deng T., Smith J.D., Hsu M., Bhate N. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces. *Applied Physics Letters*. 2010;97(23).
23. Stone H.A. Ice-Phobic Surfaces That Are Wet. *ACS Nano*. 2012;6(8):6536–6540.
24. Makkonen L. Ice Adhesion –Theory, Measurements and Countermeasures. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2012;26(4/5):413–445.
25. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Emelyanenko K.A., Modin E.B. Modus Operandi of Protective and Anti-icing Mechanisms Underlying the Design of Longstanding Outdoor Icephobic Coatings. *ACS Nano*. 2019;13(4):4335–4346.
26. Sojoudi H., Wang M., Boscher N.D., McKinley G.H., Gleason K.K. Durable and scalable icephobic surfaces: similarities and distinctions from superhydrophobic surfaces. *Soft Matter*. 2016;12(7):1927–2232.
27. Kulinich S.A., Farzaneh M. How Wetting Hysteresis Influences Ice Adhesion Strength on Superhydrophobic Surfaces. *Langmuir*. 2009;25(16):8854–8856.

28. Sarkar D.K., Farzaneh M. Superhydrophobic Coatings with Reduced Ice Adhesion. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2009;23(9):1215–1237.
29. Mishchenko L., Hatton B., Bahadur V., Taylor J.A., Krupenkin T., Aizenberg J. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets. *ACS Nano*. 2010;4(12):7699–7707.
30. Tourkine P., Le Merrer M., Quéré D. Delayed Freezing on Water Repellent Materials. *Langmuir*. 2009;25(13):7214–7216.
31. Alizadeh A., Yamada M., Li R., Shang W., Otta S., Zhong S., Ge L., Dhinojwala A., Conway K.R. et al. Dynamics of Ice Nucleation on Water Repellent Surfaces. *Langmuir*. 2012;28(6):3180–3186.
32. Saito H., Takai K., Ymauchi G. A Study On Ice Adhesiveness To Water-Repellent Coating. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 1997;46(9 Appendix):185–189.
33. Schutzius T.M., Jung S., Maitra T., Eberle P., Antonini C., Stamatopoulos C., Poulikakos D. Physics of Icing and Rational Design of Surfaces with Extraordinary Icephobicity. *Langmuir*. 2015;31(17):4807–4821.
34. Kreder M.J., Alvarenga J., Kim P., Aizenberg J. Design of anti-icing surfaces: smooth, textured or slippery? *Nature Reviews Materials*. 2016;1(1):15003.
35. Lv J., Song Y., Jiang L., Wang J. Bio-Inspired Strategies for Anti-Icing. *ACS Nano*. 2014;8(4):3152–3169.
36. Golovin K., Tuteja A. A predictive framework for the design and fabrication of icephobic polymers. *Science Advances*. 2017;3(9).
37. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M. Anti-icing Potential of Superhydrophobic Coatings. *Mendeleev Communications*. 2013;23(1):3–10.
38. Sharifi N., Dolatabadi A., Pugh M., Moreau C. Anti-icing performance and durability of suspension plasma sprayed TiO<sub>2</sub> coatings. *Cold Regions Science and Technology*. 2019;159:1–12.
39. Boinovich L., Emelyanenko A.M., Korolev V.V., Pashinin A.S. Effect of Wettability on Sessile Drop Freezing: When Superhydrophobicity Stimulates an Extreme Freezing Delay. *Langmuir*. 2014;30(6):1659–1668.
40. Antonini C., Villa F., Bernagozzi I., Amirfazli A., Marengo M. Drop Rebound after Impact: The Role of the Receding Contact Angle. *Langmuir*. 2013;29(52):16045–16050.
41. Maitra T., Tiwari M.K., Antonini C., Schoch P., Jung S., Eberle P., Poulikakos D. On the Nanoengineering of Superhydrophobic and Impalement Resistant Surface Textures below the Freezing Temperature. *Nano Letters*. 2014;14(1):172–182.
42. Tiwari M.K., Bayer I.S., Jursich G.M., Schutzius T.M., Megaridis C.M. Highly Liquid-Repellent, Large-Area, Nanostructured Poly(vinylidene fluoride)/Poly(ethyl 2-cyanoacrylate) Composite Coatings: Particle Filler Effects. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2010;2(4):1114–1119.
43. Wong T.-S., Kang S.H., Tang S.K.Y., Smythe E.J., Hatton B.D., Grinthal A., Aizenberg J. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*. 2011;477:443–447.
44. Wilson P.W., Lu W., Xu H., Kim P., Kreder M.J., Alvarenga J., Aizenberg J. Inhibition of ice nucleation by slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS). *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2013;15(2):581–585.
45. Zhang Y.-L., Xia H., Kim E., Sun H.-B. Recent developments in superhydrophobic surfaces with unique structural and functional properties. *Soft Matter*. 2012;844:11217.
46. Egorkin V.S., Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Vyalij I.E., Gnedenkov A.S., Chizhikov R.G. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2018;334:29–42.
47. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S. Composite polymer-containing protective coatings on magnesium alloy MA8. *Corrosion Science*. 2014;85:52–59.
48. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Zavidnaya A.G., Egorkin V.S., Puz' A.V., Mashtalyar D.V., Sergienko V.I., Yerokhin A.L., Matthews A. Composite hydroxyapatite-PTFE coatings on Mg-Mn-Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based rout. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2014;45(6):3104–3109.
49. Joo J., Kim D., Moon H.-S., Kim K., Lee J. Durable anti-corrosive oil-impregnated porous surface of magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation with hydrothermal treatment. *Applied Surface Science*. 2020;509:145361.
50. Al Zoubi W., Kim M.J., Kim Y.G., Ko Y.G. Fabrication of graphene oxide/8-hydroxyquinolin/inorganic coating on the magnesium surface for extraordinary corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2019;137:105314.

51. Liu A., Xu J. Preparation and corrosion resistance of superhydrophobic coatings on AZ31 magnesium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2018;28(11):2287–2293.
52. Zhang Q., Zhang H. Corrosion resistance and mechanism of micro-nano structure super-hydrophobic surface prepared by laser etching combined with coating process. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2019;66(3):264–273.
53. Wang Z., Zhang J., Li Y., Bai L. et al. Enhanced corrosion resistance of micro-arc oxidation coated magnesium alloy by superhydrophobic Mg–Al layered double hydroxide coating. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2019;29(10):2066–2077.
54. Zhang S., Cao D., Xu L., Lin Z., Meng R. Fabrication of a Superhydrophobic Polypropylene Coating on Magnesium Alloy with Improved Corrosion Resistance. *International Journal of Electrochemical Science*. 2020;15(1):177–187.
55. Wu Y., Wang Y., Liu H., Liu Y., Guo L., Jia D., Ouyang J., Zhou Y. The fabrication and hydrophobic property of micro-nano patterned surface on magnesium alloy using combined sparking sculpture and etching route. *Applied Surface Science*. 2016;389:80–87.
56. Jiang D., Xia X., Hou J., Cai G., Zhang X., Dong Z. A novel coating system with self-reparable slippery surface and active corrosion inhibition for reliable protection of Mg alloy. *Chemical Engineering Journal*. 2019;373:285–297.
57. Jiang D., Zhou H., Wan S., Cai G.-Y., Dong Z.-H. Fabrication of superhydrophobic coating on magnesium alloy with improved corrosion resistance by combining micro-arc oxidation and cyclic assembly. *Surf. Coat. Technol.* 2018;339:155–166.
58. Zhang Y., Feyerabend F., Tang S., Hu J., Lu X., Blawert C., Lin T. A study of degradation resistance and cytocompatibility of super-hydrophobic coating on magnesium. *Materials Science and Engineering: C*. 2017;78:405–412.
59. Cui X., Lin X., Liu C., Yang R., Zheng X., Gong M. Fabrication and corrosion resistance of a hydrophobic micro-arc oxidation coating on AZ31 Mg alloy. *Corros. Sci.* 2015;90:402–412.
60. Gnedenkov S.V., Egorkin V.S., Sinebryukhov S.L., Vyalii I.E., Pashinin A.S., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Formation and electrochemical properties of the superhydrophobic nanocomposite coating on PEO pretreated Mg–Mn–Ce magnesium alloy. *Surf. Coat. Technol.* 2013;232:240–246.
61. Boinovich L.B., Emelyanenko A.M., Pashinin A.S., Gnedenkov S.V., Egorkin V.S., Sinebryukhov S.L. Mg alloy treatment for superhydrophobic anticorrosion coating formation. *Surface Innovations*. 2013;1(3):162–172.
62. Li J., Wang C., Sun H., Li X. Preparation of Superhydrophobic Magnesium Alloy Surface via Fabrication of Micro/Nano Binary Structure and Modification with Perfluoropolysilane. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*. 2018;10(2):291–296.
63. Arun S., Sooraj P.N., Hariprasad S., Arunnellaiappan T., Rameshbabu N. Fabrication of superhydrophobic coating on PEO treated zirconium samples and its corrosion resistance. *Materials Today: Proceedings*. 2020;27:2056–2060.
64. Aktug S.L., Durdu S., Aktas S., Yalcin E., Usta M. Characterization and investigation of in vitro properties of antibacterial copper deposited on bioactive ZrO<sub>2</sub> coatings on zirconium. *Thin Solid Films*. 2019;681:69–77.
65. Boinovich L.B., Gnedenkov S.V., Alpysbaeva D.A., Egorkin V.S., Emelyanenko A.M., Sinebryukhov S.L., Zaretskaya A.K. Corrosion resistance of composite coatings on low-carbon steel containing hydrophobic and superhydrophobic layers in combination with oxide sublayers. *Corrosion Science*. 2012;55:238–245.
66. Fu J., Sun Y., Ji Y., Zhang J. Fabrication of robust ceramic based superhydrophobic coating on aluminum substrate via plasma electrolytic oxidation and chemical vapor deposition methods. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;306:117641.
67. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Vyalii I.E. Wettability and electrochemical properties of the highly hydrophobic coatings on PEO-pretreated aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2016;307:1241–1248.
68. Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Gnedenkov A.S., Filonina V.S., Vyalii I.E., Nadaraia K.V., Imshinetskiy I.M., Belov E.A., Izotov N.V. et al. Icephobic Performance of Combined Fluorine-Containing Composite Layers on Al–Mg–Mn–Si Alloy Surface. *Polymers*. 2021;13(21):3827.
69. Zou Y., Wang Y., Xu S., Jin T., Wei D., Ouyang J., Jia D., Zhou Y. Superhydrophobic double-layer coating for efficient heat dissipation and corrosion protection. *Chem. Eng. J.* 2019;362:638–649.

70. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Electrochemical properties of the superhydrophobic coatings on metals and alloys. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014;45(6):3075–3080.
71. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Emelyanenko A.M., Alpysbaeva D.A., Boinovich L.B. Features of the occurrence of electrochemical processes in contact of sodium chloride solutions with the surface of superhydrophobic coatings on titanium. *Russ. J. Electrochem+*. 2012;48(3):336–345.
72. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Mashtalyar D.V., Alpysbaeva D.A., Boinovich L.B. Wetting and electrochemical properties of hydrophobic and superhydrophobic coatings on titanium. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2011;383(1/3):61–66.
73. Belov E.A., Nadaraia K.V., Mashtalyar D.V., Sinebryukhov S.L., Gnedenkov S.V. Anti-icing composite fluoropolymer coatings on titanium. *St. Petersburg Polytechnic University Journal. Physics and Mathematics*. 2022;15(3.1):204–209.
74. Jiang J.Y., Xu J.L., Liu Z.H., Deng L., Sun B., Liu S.D., Wang L., Liu H.Y. Preparation, corrosion resistance and hemocompatibility of the superhydrophobic TiO<sub>2</sub> coatings on biomedical Ti-6Al-4V alloys. *Applied Surface Science*. 2015;347:591–595.
75. Chen G., Wang Y., Zou Y., Jia D., Zhou Y. A fractal-patterned coating on titanium alloy for stable passive heat dissipation and robust superhydrophobicity. *Chemical Engineering Journal*. 2019;374:231–241.
76. Wang S., Wang Y., Zou Y., Wu Y., Chen G., Ouyang J., Jia D., Zhou Y. A self-adjusting PTFE/TiO<sub>2</sub> hydrophobic double-layer coating for corrosion resistance and electrical insulation. *Chemical Engineering Journal*. 2020;402:126116.
77. Shen Y., Wu X., Tao J., Zhu C., Lai Y., Chen Z. Icephobic materials: Fundamentals, performance evaluation, and applications. *Progress in Materials Science*. 2019;103:509–557.