

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 624.143.36

DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_1_28

Д. А. Диаките, А. А. Новиков

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА НА ТВЕРДЫХ ПОДЛОЖКАХ: ОБЗОР

Ключевые слова: адгезия льда, испытание на растяжение, испытание на механический сдвиг, испытание центрифугой, супергидрофобные поверхности, льдофобные поверхности.

Накопление льда на критически важных объектах инфраструктуры, включая электросети, ветровые турбины, самолеты и морские платформы, представляет собой значительную угрозу безопасности и экономической стабильности. Образование льда может привести к деструктивным изменениям конструкции, снижению эффективности систем и созданию условий для возникновения чрезвычайных ситуаций. Для эффективного решения проблемы обледенения разработаны различные методы, включая использование антиобледенительных материалов. Эти материалы воздействуют на поверхностные слои посредством химических, термических и физических механизмов, замедляя или предотвращая образование ледяных отложений. Для объективной оценки эффективности антиобледенительных материалов в различных климатических условиях и выбора оптимальных решений для предотвращения негативного воздействия обледенения необходимо проводить испытания на адгезию. В данном обзоре литературы проведен тщательный анализ научных публикаций, посвященных методам измерения адгезии льда. Методические подходы систематизированы и классифицированы в соответствии с их теоретическими основами и практическими приложениями. Особое внимание уделено основным факторам, влияющим на адгезию льда, включая температуру, шероховатость поверхности, скорость деформации и скорость удара. Супергидрофобные и льдофобные покрытия – это инновационные решения, призванные минимизировать риски, связанные с адгезией льда. Эти материалы предназначены для предотвращения налипания льда и способствуют его естественному удалению под воздействием внешних факторов, таких как ветер, температура и сила тяжести. Применение супергидрофобных и льдофобных покрытий значительно снижает риск аварий, связанных с обледенением, и продлевает срок службы инфраструктуры, тем самым оптимизируя эксплуатационные расходы на обслуживание и ремонт оборудования.

D. A. Diakite, A. A. Novikov

METHODS FOR MEASURING THE ADHESIVE STRENGTH OF ICE ON SOLID SURFACES: A REVIEW

Key words: ice adhesion, tensile test, shear test, centrifuge test, superhydrophobic surfaces, glaciophobic surfaces.

Ice accumulation on critical infrastructure, including power grids, wind turbines, aircraft, and offshore platforms, poses a significant threat to safety and economic stability. Ice formation can lead to destructive structural changes, reduced system efficiency, and potentially lead to emergency situations. Various methods have been developed to effectively address icing, including the use of anti-icing materials. These materials act on surface layers through chemical, thermal, and physical mechanisms, slowing or preventing ice deposition. Adhesion testing is essential for objectively assessing the effectiveness of anti-icing materials in various climatic conditions and selecting optimal solutions to prevent the negative impacts of icing. This literature review provides a thorough analysis of scientific publications devoted to ice adhesion measurement methods. Methodological approaches are systematized and classified according to their theoretical foundations and practical applications. Particular attention is paid to the main factors influencing ice adhesion, including temperature, surface roughness, deformation rate, and impact velocity. Superhydrophobic and glaciophobic coatings are innovative solutions designed to minimize the risks associated with ice adhesion. These materials are designed to prevent ice buildup and promote its natural removal under the influence of external factors such as wind, temperature, and gravity. The use of superhydrophobic and glaciophobic coatings significantly reduces the risk of icing-related accidents and extends the service life of infrastructure, thereby optimizing operating costs for equipment maintenance and repair.

1 Введение

Несмотря на глобальное потепление, лед остается реальной угрозой безопасности для самолетов, морских судов, автомобильных и железнодорожных путей, морских сооружений, линий электропередач, телевизионных вышек, метеорологических приборов и различных компонентов машин в зимних условиях [1–4]. Явление обледенения твердых поверхностей обычно является источником многих неудобств и трагедий в воздушном, морском и автомобильном движении. Лед самопроизвольно и даже довольно сильно прилипает ко многим твердым поверхностям, делая их липкими или скользкими (рис. 1). Согласно

исследованиям, прочность адгезии льда зависит от химического состава, шероховатости поверхности, механических и термических свойств подложки, а также от температуры и экспериментального прибора для измерения адгезии [5]. На прочность сцепления льда с твердыми поверхностями большое влияние оказывает температура в диапазоне от -20 °С до 0 °С. Лед прилипает к холодному твердому веществу, когда жидкая вода может замерзнуть при контакте с этим твердым веществом. Чем больше воды в жидком состоянии растекается по поверхности твердого вещества с низким углом соприкосновения, тем сильнее лед будет прилипать к этому твердому веществу. Напротив, гидрофобная

поверхность для жидкой воды также будет плохо прилипать ко льду.

На долю погодных условий приходится 10-15% дорожно-транспортных происшествий, в результате которых был нанесен материальный ущерб, а также тысячи раненых и погибших [7]. Накопление льда на конструкциях, подверженных ужасным зимним условиям, является постоянной проблемой. Это мо-



Рис. 1 – Обледенение: (а) самолета и (б) ветряных турбин [6]

Fig. 1 – Icing: (a) aircraft and (b) wind turbines [6]

жет привести к увеличению лобового сопротивления на 25% и сокращению срока службы на 90% при формировании на крыльях самолетов, а также к снижению годовой выработки энергии ветряными турбинами на 17% [8]. Нарушения движения, связанные с перегрузками конструкций, вызваны накоплением льда. Важно изучать различные явления, вызванные атмосферным льдом в виде инея, льда, изморози и снега, чтобы предотвратить образование льда и уменьшить его сцепление с поверхностями материалов. Это серьезная задача для ученых, которая направлена на повышение энергоэффективности, снижение эксплуатационных расходов и минимизацию рисков аварий. Существует множество разработанных методов защиты от обледенения и размораживания, которые характеризуются значительным потреблением энергии, высокой стоимостью и потенциальным повреждением поверхностей материалов [9]. Методы противообледенения используются для устранения существующего обледенения поверхностей материалов, в то время как методы противообледенения позволяют предотвратить образование и накопление льда на твердых поверхностях. Методы термического, механического или химического размораживания используются для устранения или предотвращения образования нежелательного обледенения. Термические методы чаще всего используются в автомобильной и аэрокосмической промышленности для обработки матовых элементов, занимающих относительно небольшие площади. Для предотвращения обледенения используются химические методы, в том числе использование реагентов или солей, которые понижают температуру замерзания воды. Используются механические методы удаления льда, такие как пневматические сильфоны, пьезоэлектрические устройства и ручное

размораживание. Методы защиты от обледенения предпочтительнее методов размораживания с точки зрения эффективности, поскольку они предотвращают образование льда. Эти методы могут быть активными, в которых используются внешние источники энергии, такие как тепло, для предотвращения образования льда, или пассивными, когда системе не требуется дополнительная энергия для стимулирования раннего расслоения льда или предотвращения его образования. Использование пассивных противообледенительных покрытий является одним из наиболее предпочтительных подходов к борьбе с накоплением льда на поверхностях материалов.

Для создания противообледенительных покрытий необходимо уменьшить силу сцепления льда с поверхностью материалов [10,11]. Это наиболее эффективный метод пассивного удаления льда при нескольких применениях во избежание нежелательного обледенения. Противообледенительные поверхности, основанные на удалении воды или замедлении образования льда, подвергаются разрушению в процессе обледенения и размораживания, что сокращает их срок службы [12]. Однако использование противообледенительных материалов с низкой силой сцепления может продлить срок службы, хотя эти покрытия также подвержены разрушению в процессе удаления льда с течением времени. В настоящее время существует множество «льдофобных» поверхностей, разработанных для борьбы с образованием льда за счет уменьшения его адгезии к поверхностям [13–16]. Льдофобные материалы задерживают время замерзания капель, предотвращают образование наледи, снижают скорость накопления льда и способствуют отскоку переохлажденных капель при отрицательных температурах [17,18]. Льдофобные покрытия характеризуются низким коэффициентом адгезии ко льду, менее 100 кПа [18] в отличие от алюминия и стали, которые имеют 1600 и 1400 кПа соответственно. Поверхности с низким коэффициентом трения, взаимодействующие со льдом, характеризуются силами сцепления менее 60 кПа [16]. При значениях силы сцепления льда с поверхностью менее 20 кПа естественное отслоение льда может происходить под воздействием вибрации, воздействия собственного веса или ветровой нагрузки [17]. Многие разработанные пассивные противообледенительные покрытия позволяют значительно снизить силу сцепления до значений менее 1 кПа [19–22]. Однако эти покрытия изготовлены из мягких материалов, таких как полимеры или эластомеры, которые могут разрушаться в условиях обледенения или ударной эрозии, что снижает их эффективность [23]. Взаимосвязь между льдофобией и супергидрофобией в настоящее время является предметом активных дискуссий, и большинство экспертов пришли к выводу, что прямой корреляции между ними нет. Однако, помимо сходства в способности отталкивать воду и лед, другие сходства наблюдаются на разных уровнях, включая гидрофобный эффект, гидрофобные взаимодействия, механизмы

сворачивания белков и процессы образования кристаллов льда [24].

В этой обзорной статье представлен анализ методов измерения адгезии льда, используемых для тестирования существующих в литературе материалов для размораживания и льдофобии. Методологический подход основан на систематической классификации, которая позволяет структурировать и унифицировать данные по различным методам оценки адгезионных свойств льда. Каждый раздел статьи включает подробный обзор соответствующей литературы, предлагающий глубокое погружение в теоретические и практические аспекты каждой категории методов. Представлена разработка новых супергидрофобных материалов, а также использование скользких пористых поверхностей, пропитанных жидкостью, которые снижают прочность сцепления в области размораживания и льдофобности.

2 Методы измерения адгезии льда

В экстремальных температурных условиях наиболее эффективной стратегией предотвращения нежелательного обледенения является снижение прочности сцепления льда с поверхностью. Использование противогололедных покрытий, основанных на удалении воды или замедлении образования льда, сопряжено с высокими рисками, включая недостаточную долговечность и повышенную неопределенность. Кроме того, такие покрытия характеризуются ухудшением структуры и антиобледенительных свойств при циклах обледенения и оттаивания. Поэтому противогололедные покрытия с низкой адгезией обладают большей устойчивостью к длительным эксплуатационным нагрузкам, хотя и подвержены разрушению при механическом удалении льда. Льдофобные поверхности характеризуются низкой адгезией (<100 кПа), что может существенно влиять на динамику образования льда и приводить к его удалению [25]. Определение адгезионной прочности льда является сложной и многогранной задачей, требующей применения различных методов и подходов. Мейлер и др. [26] отметили, что готового прибора для измерения адгезионной прочности льда не существует. Однако существует множество методик оценки адгезионной прочности льда, каждая из которых имеет свои особенности и интерпретацию результатов [27,28]. При этом конечные значения адгезионной прочности существенно зависят от типа исследуемого льда и выбранного метода испытаний. Адгезионную прочность τ часто рассчитывают по формуле:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{mr\omega^2}{A} \quad [\text{Па}],$$

где F [Н] представляет собой максимальную силу, приводящую к разрыву, а A [м²] - общая площадь контакта льда с субстратом.

Методы оценки адгезии льда можно систематизировать в рамках нескольких подходов, рассматривающих различные типы напряжений, возникающих в зоне контакта и в зоне трехфазного

взаимодействия под действием нагрузки [29]. Изучение взаимодействия льда с твердыми поверхностями занимается изучением влияния напряжений на геометрию системы и свойства материалов. В общем случае разрушение контакта твердых тел происходит из-за четырех основных типов напряжений: растяжения, сдвига, отслаивания и откола [30]. Однако в литературе обычно рассматриваются два типа напряжений (растягивающие и сдвиговые) в качестве основных факторов, ответственных за разрушение интерфейса контакта лед/твердое тело [31]. Методы, используемые для измерения адгезии льда, можно разделить на три категории: общие прямые механические испытания, испытания на центрифуге и смешанные испытания (рис. 2).

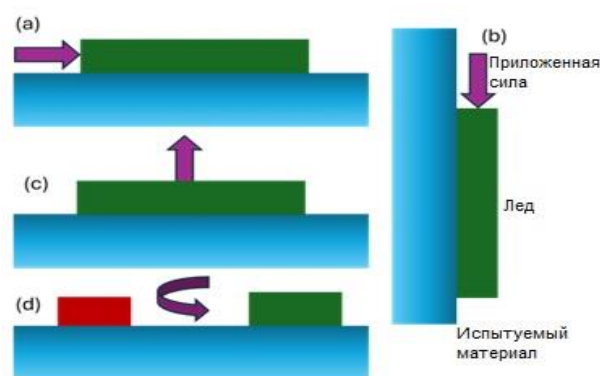


Рис. 2 – Схемы четырех наиболее часто используемых методов измерения адгезионной прочности льда: (а) горизонтальный сдвиг, (б) вертикальный сдвиг, (в) испытание на растяжение и (г) центрифуга с противовесом слева [10]

Fig. 2 – Schematic diagrams of the four most commonly used methods for measuring the adhesive strength of ice: (a) horizontal shear, (b) vertical shear, (c) tensile test, and (d) centrifuge with counterweight on the left [10]

2.1 Общие прямые механические испытания

Механические испытания материалов, в том числе льда, могут быть успешно проведены с использованием специализированного оборудования, такого как разрывные машины и холодные плиты с толкателями [32]. В ходе этих испытаний лёд подвергается механическому воздействию, что приводит к его разрушению. После механических испытаний можно быстро оценить поверхность полученных образцов льда на наличие неровностей и структурных дефектов [33]. Это даёт ценную информацию о механических свойствах материала и его стойкости к внешним воздействиям.

2.1.1 Испытание на растяжение

Испытание на растяжение является фундаментальным методом в материаловедении и инженерии, при котором образец подвергается контролируемому механическому воздействию до разрушения. Оно оценивает реакцию материалов на

растягивающие усилия путем удлинения образца до разрушения, предоставляя информацию о предельных значениях напряжения и деформации. Понимание результатов важно для выбора материалов, соответствующих критериям безопасности и эксплуатационным требованиям. В ходе испытания определяются механические характеристики материала, такие как максимальное удлинение, предел прочности на растяжение, предел прочности на растяжение и сужение поперечного сечения материала. Измерение прочности на растяжение льда с твердым телом может быть некорректным из-за возможного когезионного разрушения льда при высоких значениях [34]. Тем не менее, такие измерения полезны для анализа различных образцов льда, их состава и поверхностей.

Миршахиди и др. [20] разработали мощное и недорогое устройство для измерения прочности льда на разрыв на различных поверхностях (рис. 3). Экспериментальные испытания с различными параметрами (температура, скорость разрыва, толщина подложки, площадь контакта) подтвердили точность измерений.



Рис. 3 – Четыре основные структуры системы измерения сцепления со льдом при растяжении [20]

Fig. 3 – Four basic structures of the ice traction measurement system [20]

Гао и др. [35] разработали новый противообледенительный материал – жидконаполненное микронаноструктурированное покрытие на основе органометаллической матрицы. Определение прочности сцепления со льдом на разрыв использовалось для отрыва ледяного цилиндра от поверхности образца. Исследование показало, что жидконаполненное органометаллическое микронаноструктурированное покрытие обладает противообледенительными свойствами, способными предотвращать обледенение при температуре до $-39\text{ }^{\circ}\text{C}$, с силой сцепления со льдом около 10 кПа. Они отметили, что наноструктуры уменьшают площадь контакта и предотвращают теплопередачу, а смазочный слой снижает адгезию со льдом. Хе и др. [36] провели исследование адгезионных свойств герметиков, используемых для ремонта дорог на северо-востоке Китая в экстремальных условиях. Они оценили

адгезионные свойства восьми герметиков при высокой температуре, низкой температуре и многократных циклах замораживания-оттаивания. Механические свойства материалов исследовались при низких температурах с использованием испытаний на растяжение и метода рассеяния энергии. Результаты их исследования показали значительное снижение адгезионной прочности герметиков из-за кратковременного старения и ухудшения характеристик в циклах замораживания-оттаивания. Погружение в воду при низкой температуре увеличило адгезионную прочность на 48,1%. Усовершенствованный метод рассеяния энергии позволил более точно оценить изменения в суровых условиях. В исследовании механизмов разрушения под действием напряжений и прочности границы ледяного субстрата авторы статьи [37] объединили эксперименты, численное моделирование и анализ для изучения межфазного разрушения цилиндрических ледяных скоплений на растянутых алюминиевых поверхностях. Экспериментальные результаты показали, что шероховатость поверхности влияет на адгезию льда, а площадь контакта при одинаковой шероховатости обратно пропорциональна адгезионной прочности. Модель когезионной зоны анализирует микромасштабные напряжения и деформации при разрушении льда. Интеграция данных в моделирование выявляет влияние шероховатости и площади контакта на прочность льда.

2.1.2 Испытание на сдвиг

Испытания на сдвиг являются широко используемым методическим инструментом для изучения механических свойств различных материалов, включая металлы и пластмассы. Этот тип испытаний позволяет детально проанализировать поведение материалов под действием сдвиговых напряжений, что необходимо для понимания их структурных и прочностных характеристик. Кроме того, испытания на сдвиг играют важную роль в изучении реологических свойств жидкостей и гелеобразных материалов, таких как лосьоны, эмульсии, смолы, расплавы полимеров, суспензии и масла. Эти исследования способствуют лучшему пониманию механизмов текучести и вязкости этих веществ, что важно для разработки новых материалов и технологий в различных отраслях промышленности. Испытания на сдвиг – это метод, в котором к образцу льда прикладывается сила для равномерного распределения усилий на границе раздела. Прочность льда на сдвиг зависит от дефектов поверхностного слоя и деформации контактирующих поверхностей. В зависимости от типа льда (замороженный, иней, смешанный) это приводит к разным значениям прочности из-за различий в дефектах и деформациях при одной и той же нагрузке. Различные экспериментальные установки разработаны для минимизации влияния неоднородности межфазного напряжения и дефектов льда на измеряемые параметры прочности на сдвиг. В методе горизонтального сдвига или испытания на

сдвиг вода наливается в форму на испытуемый материал и к форме или льду прикладывается сила для измерения максимальной силы [38–40]. Сила адгезии рассчитывается с учетом площади поперечного сечения. Формы форм могут быть прямоугольными или цилиндрическими стаканами, или пластиковыми кюветами [38]. Испытание на сдвиг часто используется для оценки новых супергидрофобных противогололедных материалов [32,41]. Оно подходит для испытания пропитанных смазкой нанотекстурированных поверхностей, поскольку не требует дополнительного оборудования или подготовки. Лед вступает в прямой контакт с материалом. Ву и др. [38] использовали кювету, заполненную приблизительно 3 мл свежей дистиллированной воды при температуре -10°C , для испытания поверхностей, пропитанных смазкой, с фототермической реакцией на оттаивание и уменьшение накопления льда. Лю и др. [42] поместили образец пропитанных жидкостью пористых скользких поверхностей, полученных из смазок на основе полидиметилсилоксана (ПДМС), этилолеата и перфторполиэфира (ПФПЭ), в кювету, содержащую 1,5 мл деионизированной воды при температуре -20°C , на 12 часов, чтобы добиться отсоединения кюветы от поверхности образца, когда температура поверхности образца достигала -10°C . В другом похожем исследовании Чжана и др. [43] изучалась прочность сцепления льда с поверхностью образца. Пластиковую оболочку, содержащую 5 мл деионизированной воды, помещали на образец пропитанной смазкой скользящей поверхности, изготовленной с использованием полидиметилсилоксановой смолы (ПДМС) и диметилсилоконового масла (ПМХ-200), а затем помещали в холодильник при температуре около -20°C на 3 часа для полного заморозания деионизированной воды и её адгезии к поверхности образца. Размораживание завершали отделением зонда от ледяного столбика на поверхности образца. Размораживание прекращалось отделением зонда-столбика льда от поверхности образца. В работе [44] квазикристаллические покрытия на основе алюминиевых сплавов наносились на алюминиевые подложки методом высокоскоростного кислородно-топливного распыления. Исследования показали, что покрытия эффективно борются с обледенением, особенно при длине льда более 2 см, где предел прочности на разрыв границы раздела составляет около 30 кПа. Покрытия демонстрируют высокую морозостойкость и прочность после механических и химических воздействий. В большинстве экспериментальных исследований методом горизонтального сдвига усилие прикладывалось непосредственно к поверхности кюветы или формы, а не к ледяной матрице.

Испытание на вертикальный сдвиг по сути эквивалентно испытанию на горизонтальный сдвиг. Основное отличие заключается в ориентации всей испытательной установки, которая повернута на 90° вокруг вертикальной оси (см. рис. 2b). Как в испытаниях на вертикальный, так и в испытаниях на горизонтальный сдвиг определение максимальной

силы осуществляется с помощью датчика силы. Этот датчик регистрирует критический момент отрыва ледяного массива от исследуемой поверхности, сигнализируя о резком снижении регистрируемой силы. В испытаниях на вертикальный сдвиг максимальная сила определяется силами гравитации, что делает прочность сцепления льда напрямую зависящей от его геометрических параметров, таких как площадь поверхности и высота образца.

Испытания на сдвиг также можно разделить на три основные геометрии. Первая – это геометрия перекрытия, где исследуемый лёд помещается между двумя плоскими пластинами. Вторая – это испытание с конусом 0° и аналогичными конфигурациями. Третья – это геометрия вращательного сдвига. Каждая из этих геометрических конфигураций предоставляет уникальные данные о поведении материала под действием сдвигового напряжения.

Испытание на сдвиг внахлест является одним из наиболее широко используемых методов оценки прочности материалов на сдвиг. Этот метод был впервые описан и систематизирован в трудах таких выдающихся ученых, как Еллинек [45], Форд и Николс [46], чьи исследования заложили основу для дальнейшего развития этой области. Испытание на конический излом 0° является методологической модификацией классического испытания на сдвиг внахлест. Эта методика была впервые предложена Хенелем и Мулерином путем интеграции в исследование передового анализа напряжений с использованием метода конечных элементов [47]. В этой конструкции (рис. 4) внутренний цилиндрический стержень вставлен во внешний полый цилиндр, образующий вокруг него кольцо [48]. Центральный элемент снабжен выемкой в основании, что обеспечивает его позиционирование в центре полого цилиндра. Полость между стержнем и полым цилиндром заполняется водой, которая затем замораживается. После замораживания стержень извлекается для оценки прочности сцепления со льдом.



Рис. 4 – Диаграмма испытания конуса 0° для определения прочности сцепления на льду [48]

Fig. 4 – Diagram of the 0° cone test for determining adhesion strength on ice [48]

Испытания на сдвиг вращением представляют собой методологическую процедуру, состоящую из придания образцу льда специальной формы, его последующего закрепления на основании, а затем на вращающемся механизме. Этот механизм приводится

в движение с целью инициирования деформационных процессов, приводящих к разрушению адгезионных связей между льдом и вращающимся элементом. Таким образом, данный экспериментальный подход позволяет количественно оценить прочностные характеристики льда в условиях динамического нагружения. Рарати и Табор [49] исследовали сдвиговые свойства границы лед/твердое тело, используя два типа приборов для испытания сдвигом вращением: цилиндрический и кольцевой. В первом случае использовался цилиндрический образец, на поверхность которого был нанесен слой льда, и массивная опорная плита. Сдвиг происходил между льдом и цилиндрической поверхностью раздела (рис. 5a). На краю цилиндра наблюдалось сложное распределение напряжений, что затрудняло интерпретацию результатов. Для преодоления этих трудностей был использован кольцевой образец (рис. 5b). Этот образец использовался для изучения пластических свойств льда. Результаты, полученные с использованием цилиндрических и кольцевых образцов, оказались схожими.

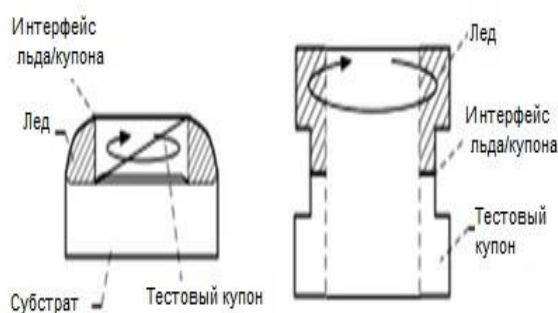


Рис. 5 – Роторно-срезной аппарат Рарати и Табора [49] ; (a) цилиндрический и (b) кольцевой

Fig. 5 – Rotating shear apparatus by Rarati and Tabora [49]; (a) cylindrical and (b) ring-shaped

2.2 Центрифужные испытания

Центробежные испытания, основанные на принципе центростремительного ускорения, являются методом количественной оценки прочностных характеристик материалов. В ходе эксперимента небольшой образец льда прикрепляется к балке и подвергается возрастающему вращательному движению. Образец льда подвергается интенсивным механическим напряжениям из-за контакта с внутренними стенками камеры центрифуги. Возникновение механических напряжений приводит к разрушению кристаллической структуры льда в процессе эксперимента [50]. Точный момент отрыва образца от поверхности балки регистрируется с соответствующей угловой скоростью для получения силы отрыва. Центробежные испытания предпочтительнее других методов высокой воспроизводимостью измерений и повышенной вероятностью разрушения адгезии [51]. Однако метод центробежных испытаний адгезии имеет ряд недостатков. Во-первых, образцы не сохраняются, что затрудняет исследование сдвигового интерфейса.

Во-вторых, невозможно записать кривые напряжение-деформация и детально проанализировать результаты. В-третьих, изменяется геометрия льда на краях образца, что приводит к переменной концентрации напряжений.

Джанджуа и др. [34] исследовали адгезию льда к четырем непроводящим и семи теплопроводящим покрытиям для борьбы с обледенением передней кромки крыльев самолетов. Для этого они собрали образцы льда с пластин, полученных центрифугированием, и подвергли их повторным испытаниям, каждый раз извлекая образцы льда из ранее использованных покрытий. Коивулуто и др. [52] спроектировали и изготовили аэродинамическую трубу для обледенения на основе описания Лафорта и Бейсвенгера [51]. Испытания на обледенение включают накопление льда в аэродинамической трубе с использованием холодильной камеры и оценку адгезии с использованием метода центробежных испытаний. Во время центробежного испытания на адгезию льда пластина с замороженной поверхностью вращается с ускоренной скоростью до тех пор, пока лед не оторвется. Момент отрыва регистрируется с помощью датчика ускорения. Джамил и др. [53] реализовали самоочищающуюся, пассивную льдофобную фототермическую ловушку, которая оттаивает поверхности путем преобразования солнечного света в тепло на границе раздела лед-подложка. Ловушка состоит из трех слоев: поглощающего солнечное излучение слоя свечной сажи, наночастиц магнитного оксида железа (Fe_3O_4) для рассеивания тепла и вулканизированной при комнатной температуре (RTV) изоляции для снижения теплопотерь. Слой RTV наносился методом центрифугирования (3000 об/мин). Ловушка удаляла замороженную каплю (10 мкл) за 40 с и полностью превращала ее в воду за 7 мин при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ под воздействием солнечного света. Она также растапливала полностью покрытый инеем слой за 100 с при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Средняя длина оттаивания составила 25 мм при лазерном облучении в течение 45 с. Эффективность обеспечивается наноструктурами силиконового масла и идентичной химией связующего, что позволяет проводить длительное оттаивание при отрицательных температурах. Дотан и др. [54] исследовали взаимосвязь между смачиваемостью и адгезией льда, создавая поликарбонатные поверхности с различным уровнем гидрофобности. Для характеристики замороженных образцов был проведен тест на адгезию с использованием центрифуги. Испытания показали, что ультрагидрофобные поверхности значительно снижают адгезию льда (в 18 раз по сравнению с необработанным алюминием). В работе [55] предложена аналитическая модель адгезионного напряжения сдвига для неограниченно выросшего льда, учитывающая наличие слоя аморфной жидкости на границе раздела подложка/лёд, прилипающего за счёт капиллярного эффекта. Модель применима к жёстким подложкам. Для валидации было проведено 54 испытания на адгезию методом центрифугирования (CAT) на трёх

подложках при различных температурах. Стратегия валидации заключается в расчёте времени зарождения капель воды при ударе, что подтвердило соответствие модели теории и литературным данным. Чтобы уменьшить обледенение самолетов, разрабатывается испытательная установка с новым стендом для оценки прочности на сдвиг ударного льда [56]. Одним из эффективных методов измерения адгезии льда является инструментальный центрифужный тест на адгезию (ICAT). Большинство стендов ICAT не позволяют контролировать скорость деформации льда. Новый стенд, разработанный для туннеля НАСА, может быть установлен в холодильной камере с насадкой для создания облаков ударного обледенения. Он работает так же, как современные стенды ICAT, и позволяет изменять ускорение двигателя для контроля скорости деформации льда, что позволяет исследовать его влияние на силу сцепления.

2.3 Различные испытания

Помимо традиционных методов испытаний, таких как прямой сдвиг и центрифугирование, давно разработаны и другие подходы. Среди различных альтернативных методов, разработанных и испытанных для оценки адгезионных свойств материалов на поверхности льда, выделяются испытания на отслаивание, образование пузырей и лазерное скалывание.

2.3.1 Испытание на отслаивание

Испытание на отрыв оценивает прочность сцепления материалов путем измерения силы, необходимой для их разделения под определенным углом и с определенной скоростью. Этот метод применяется к гибким материалам (лентам, пленкам) и композитным материалам (металлам, пластикам). Результаты испытания на отрыв включают начальную силу, среднюю силу и прочность на отрыв (среднюю силу на единицу ширины). Эти испытания применяются в аэрокосмической, автомобильной, электронной и упаковочной промышленности.

В 1987 году Скавуццо и Чу [57] использовали туннель для исследования обледенения (IRT) в исследовательском центре Льюиса НАСА для моделирования естественного накопления льда в различных условиях обледенения. Два испытательных устройства измеряли прочность сцепления при сдвиге и отслоении. Проведенные испытания предоставили дополнительные данные о механических свойствах инея и льда в контролируемых условиях. Результаты согласуются с исследованиями других ученых. Максимальная прочность сцепления при сдвиге между ударным льдом и гладкими поверхностями составляет до 120 фунтов на квадратный дюйм, обычно от 40 до 80 фунтов на квадратный дюйм. Она увеличивается с увеличением скорости ветра и размера капель, что связано с их импульсом. Прочность сцепления при сдвиге постоянна при температурах ниже 25 °C и в диапазоне от 25 °C до точки плавления она линейно уменьшается. Были исследованы алюминий, сталь и неопрен. Прочность на сдвиг для всех материалов осталась неизменной. Воздействие льда на неопрен

сопоставимо с воздействием металлических поверхностей. Исследователи Скавуццо и Чу обнаружили крайне низкую прочность сцепления льда между поверхностями металлических и неопреновых материалов при углах отслаивания выше стандартного, в диапазоне от 1 до 5 фунтов на квадратный дюйм.

2.3.2 Испытание на образование пузырей

В последние годы метод пузыреобразования, благодаря относительной простоте проведения и подготовки исследуемых образцов, нашёл широкое применение в области измерения энергии адгезии тонких гибких мембран, прикреплённых к жёстким подложкам. В 1961 году Данненберг разработал первый метод пузыреобразования под давлением для измерения адгезии органических покрытий [58]. Принцип метода основан на образовании пузыря при впрыскивании жидкости под давлением между покрытием и подложкой. Энергия, необходимая для отрыва 1 см² покрытия, определяется путём измерения зависимости давления жидкости от объёма и расчёта площади под кривой. Инь и др. [59] разработали теоретическую модель испытания на пузырение, учитывающую фрикционное скольжение на границе раздела, чтобы охарактеризовать двумерные (2D) материалы. Испытание на пузырение, объединённое с анализами [60], было разработано для оценки адгезии между графеном, выращенным методом химического осаждения из газовой фазы, и медной подложкой. Композитная пленка графен/фоторезист подвергалась воздействию давления деионизированной воды через отверстие диаметром 1 мм в меди, а прогиб мембраны измерялся методом интерференции полного поля. Модель пластины, учитывающая начальное натяжение и ослабленное граничное условие, позволила рассчитать скорость высвобождения энергии и кривые вязкости пробоя для интерфейса графен/медь. Ход пучка подтвержден рамановской спектроскопией. Измеренная энергия адгезии графен/медь выше, чем у фоторезиста/меди, но ниже, чем предыдущие данные для графена на медной фольге.

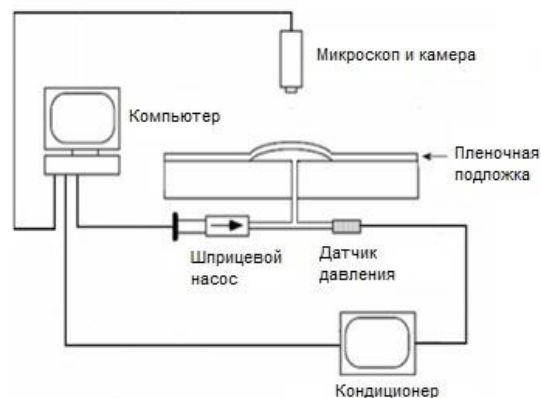


Рис. 6 – Схема устройства для испытания на образование пузырей [60]

Fig. 6 – Diagram of a device for testing bubble formation [60]

2.3.3 Испытание на лазерное расщепление

Для удовлетворения потребности в бесконтактных количественных методах оценки адгезии для характеристики прочности сцепления поверхностей был разработан ряд лазерных технологий, включая технологию лазерного откола. Испытание на лазерное отколо является эффективным методом контроля качества соединения с помощью импульсного лазера, генерирующего ударные волны с высокой скоростью деформации [61]. Эволюция лазерного откола, впервые описанного в 1960 году Аскардионом, Г. и Моресом, Э., началась с генерации ударных волн во время лазерного испарения металлических поверхностей [62]. Кобаяши и др. [63] измерили прочность на разрыв на границе раздела покрытий из диоксида циркония (ZrO_2), нанесенных плазменным напылением туннельного типа, и подложек из нержавеющей стали с помощью лазерного откола. В исследовании, направленном на получение первых воспроизводимых данных о прочности на разрыв поликристаллического льда при динамической нагрузке, Салетти и др. [64] впервые использовали технику испытания на лазерный откол. Метод заключался в приложении растягивающей нагрузки со скоростями деформации от 41 с^{-1} до 271 с^{-1} . Результаты экспериментов показали, что предел прочности на растяжение зависит главным образом от скорости деформации и составляет от 1,9 до 16,3 МПа.

3 Адгезия льда к супергидрофобным поверхностям

Исследования адгезии льда необходимы во многих прикладных областях, включая строительство, авиацию и судоходство. Понимание фундаментальных механизмов адгезии позволяет разрабатывать новые материалы и технологии для надежного сцепления льда с различными поверхностями, что способствует повышению безопасности и эффективности инженерных сооружений в условиях низких температур и высокой влажности. Адгезия льда к твердым поверхностям определяется химическими и физическими механизмами и характеризуется прочностью сцепления, которая является основной мерой контактной прочности [65]. Методы измерения адгезии льда изучают напряжения на границе раздела лед-подложка и в трехфазной зоне контакта лед-подложка-воздух под нагрузкой. Наиболее широко используются напряжения растяжения и сдвига. Новые экспериментальные устройства для измерения адгезионной прочности появляются каждый год. Недавние исследования показали, что супергидрофобные покрытия с низким гистерезисом смачивания и контактными углами отскока более 160° имеют меньшую прочность сцепления со льдом по сравнению с гидрофобными покрытиями [66,67]. Смачивание супергидрофобной поверхности происходит гетерогенно при контакте воды с твердой поверхностью и пузырьками воздуха. Для оценки адгезии необходимо измерить фактическую силу и площадь контакта, зависящие от площади поверхности и коэффициента шероховатости. Измерение фактической площади контакта

затруднено, поэтому для характеристики экспериментальной силы адгезии используют кажущуюся площадь поверхности. Экспериментальные данные показывают, что сила адгезии супергидрофобных поверхностей значительно выше ожидаемой. В некоторых случаях она даже выше, чем у гладкой гидрофобной подложки с тем же химическим составом [68]. Это может быть связано с неравномерным нанесением гидрофобного слоя и выделением скрытой теплоты при замерзании льда.

Образование льда при отрицательных температурах увеличивает риски, затраты и снижает производительность. Для уменьшения адгезии льда исследуются супергидрофобные поверхности. Супергидрофобные поверхности из-за своих несмачивающих свойств уменьшают площадь контакта льда с поверхностью, тем самым снижая сопротивление адгезии. Авторы этой статьи [69] исследовали прочность адгезии при сдвиге для серии супергидрофобных покрытий на основе термопластика с содержанием частиц. Они обнаружили, что высокая концентрация частиц (более 40%) увеличивает напряжение сдвига из-за эффекта прикрепления льда к трещинам. Чтобы минимизировать адгезию льда, необходимо поддерживать содержание наночастиц на минимальном уровне, сохраняя при этом смачиваемость по Кэсси-Бакстеру. Для полиуретановых покрытий содержание наночастиц диоксида кремния следует поддерживать на уровне 35–40% для предотвращения растрескивания. Ван и др. [70] исследовали влияние отфильтрованной топографии на адгезию льда для случайных супергидрофобных покрытий, нанося покрытия из наночастиц кремния и полимерного связующего на стекла и измеряя прочность на сдвиг. Адгезия уменьшалась с увеличением содержания частиц до 40%, после чего оставалась постоянной. Линг и др. [71] исследовали влияние смачиваемости и рельефа поверхности на прочность связи льда с медью, нержавеющей сталью 316 и стальной сеткой с углеродными нанотрубками. Тончайшая сетка из нержавеющей стали показала 93% снижение адгезии льда по сравнению с полированной сталью, в то время как супергидрофобные бруски увеличили адгезию на 67% по сравнению с полированной медью. Сравнение динамических углов смачивания выявило слабую связь между смачиваемостью и адгезией льда. Анализ процесса образования льда и механики разрушения показал, что на неплоских поверхностях действуют два механизма: механическая пропитка льда, усиливающая адгезию, и образование микротрещин, снижающее адгезию. Метод снижения шероховатости супергидрофобного нанокompозитного покрытия из полиуретана, кремния и фторакрила был представлен группой Дэвиса [72]. Изменение жидкости-носителя, фторполимерной жидкости, предварительной обработки и параметров напыления привело к получению шероховатостей 8,7 мкм, 2,7 мкм и 1,6 мкм. Все поверхности показали супергидрофобность с небольшими вариациями асимметрии и эксцесса.

Поверхность с шероховатостью 1,6 мкм была самой гладкой супергидрофобной поверхностью, полученной этим методом. Эти три поверхности и полированный алюминий были испытаны на обледенение и адгезию льда, измеренную по сцеплению. Супергидрофобные покрытия показали меньшую адгезию, чем полированный алюминий, а самое льдофобное покрытие снизило адгезию льда на 60%. Чен и соавт. [32] создали льдофобные самосмазывающиеся покрытия из амфифильных сополимеров полидиметилсилоксана ПДМС и поли(этиленгликоля) (ПЭГ) в полимерной матрице, которые демонстрируют адгезию ко льду около 50 кПа, тем самым снижая низкую силу адгезии ко льду. В [73] было разработано новое долговечное покрытие с превосходными льдофобными характеристиками путем интеграции пористых металлических каркасов и водоотталкивающего наполнителя. Двухфазный слой никеля/полидиметилсилоксана (ПДМС), изготовленный из пористых никелевых пен и ПДМС, проявляет хорошие льдофобные свойства и механическую прочность. Микротрещины на границе лед/твердое тело разрушают лед, улучшая сцепление. После водной и песчаной эрозии свойства сохраняются. Сочетание прочности никелевого каркаса и водоотталкивающих свойств ПДМС обеспечивает высокую морозостойкость и долговечность.

Использование пористых и блестящих пропиток на поверхностях — это потенциальные растворы для решения проблем, возникающих в процессе жизни. Поверхности имеют блестящие поры, пропитанные жидкостью, из-за конденсации воды в порах и уменьшения прилипания глянца к введению смазочного материала [74]. Эти поверхности имеют повышенную гидрофобность с возможным гистерезисом угла контакта ($<2,5^\circ$) и невозможным углом наклона ($<5^\circ$). С. Агдам и Себечи [75] использовали технологию облицовки кушеток для кушеток (LbL) для создания морщинистых поверхностей с отрицательными и положительными зарядами полиэлектролитов и отрицательными наночастицами кремния. Пленки смазываются флюором под поднятым углом контакта и неверным гистерезисом с водой, что приводит к разрыву льдофобов. В отчетах о тяге подтверждаются свойства сопротивления на стекле с нижней силой сцепления 5 кПа. После 100 дней использования пленки уменьшаются на 65% от силы прилипания глазури и после 50 циклов выдержки/разморозки, собственность льдофобов сохраняется на 80%. Акташ и др. [76] оценили потенциал поверхностей, которые могут быть повреждены импрегнированными жидкостями из-за распыления газа для предотвращения загрязнения в промышленности. Металлические покрытия (NiCr) и керамика (Al_2O_3) имеют повышенную пористость: 14,8% для FS- Al_2O_3 и 6,7% для FS-NiCr. Введение в смазочные материалы, которые позволяют силикону и эпоксидной мастике повысить способность к скольжению и создают льдофобные поверхности. Поверхности имеют сильную адгезию к стеклу (100 кПа), а скользящие поверхности имеют слабую

адгезию (63 кПа) после первого цикла разглаживания-разглаживания, что приводит к ухудшению смысла жизни. Структуры создают условия для сопротивления циклам благодати до оставшегося дома. Высокие требования обеспечивают стабильное прилегание (60 кПа) в течение четырех циклов. Эффективное распыление газовых растворов для нанесения покрытия на металлические и керамические поверхности.

Закключение

Исследование прилипания ледяного покрова представляет собой сложный процесс, который зависит от характеристик окружающей среды, влажности и качества ледяного покрова. Температура влияет на структуру и жесткость глазури, что наиболее важно для размораживания. Диапазон значений температуры, влияющий на температуру, составляет от -20°C до 0°C . В литературе это демонстрация того, как увеличивается морщинистость поверхности, а также уменьшение температуры, что приводит к увеличению адгезии. Кроме того, эта зависимость от остальных объектов активных исследований и существующих механизмов не является полностью объясненной. В сложных условиях напряжения и деформации метод испытания должен выбираться в соответствии с поставленной целью. Для объективной оценки характеристик механических противообледенительных систем необходимо, чтобы условия испытаний максимально соответствовали эксплуатационным параметрам самой системы. Исходные данные испытаний должны быть измерены метрологическим способом. Это подразумевает исключительное использование калиброванных измерительных приборов, таких как тензодатчики, датчики нагрузки или тензометры. Анализ деформации или нагрузки в результате разрушения льда может стать ценным источником информации для модификации конструктивных элементов системы.

Супергидрофобные поверхности, устойчивые к химическим и механическим воздействиям, облегчают удаление льда и снега за счет уменьшения площади контакта с водой/льдом. Исследователи выявили два конкурирующих механизма, влияющих на прочность сцепления льда с неплюской поверхностью: механическое введение кристаллов льда в структурные элементы поверхности, что усиливает сцепление, и образование микротрещин на поверхности, что приводит к снижению адгезии. Эти механизмы играют ключевую роль в определении эффективности удаления отложений льда с различных материалов. В этом контексте были рассмотрены новые стратегии, основанные на использовании смазывающих свойств Толстого масляного слоя или водного слоя, гидратированного при низкой температуре, для создания льдофобных покрытий. Хотя некоторые аспекты этих подходов уже были описаны в научной литературе, необходимы дополнительные исследования, чтобы подтвердить их промышленную применимость. Особое внимание уделяется изучению долговечности

покрытий с масляными слоями, встроенных в текстурированные полимерные или металлические матрицы, при воздействии реальных атмосферных факторов, характерных для крупных промышленных центров, таких как пыль, коррозионные газы и осадки. Таким образом, дальнейшее изучение этих материалов требует комплексного подхода, включающего как лабораторные испытания, так и полевые наблюдения, для оценки их эффективности и долговечности в реальных условиях эксплуатации.

Литература

- Makkonen L. Journal of Adhesion Science and Technology. Taylor & Francis; 26: 413–45 (2012). <https://doi.org/10.1163/016942411X574583>
- DIAKITE, D. A., and NOVIKOV, A. A. *Revue Internationale du Chercheur*, 6, 2, 1247 1275 (2025). DOI: 10.5281/zenodo.15733137.
- Zhang F, Yan H, Chen M. Small. 20: e2312226 (2024). <https://doi.org/10.1002/sml.202312226>
- Huang W, Huang J, Guo Z and Liu W. Adv Colloid Interface Sci. 304:102658 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102658>
- Laforte C. – Université du Québec à Chicoutimi, (2001). <https://doi.org/10.1522/12599107>
- Sanjay S. Latthe, Rajaram S. Sutar, Appasaheb K. Bhosale, Saravanan Nagappan, Chang-Sik Ha, Kishor Kumar Sadasivuni, Shanhu Liu and Ruimin Xing. Progress in Organic Coatings. 137:105373 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105373>
- S Zhang, J Huang, Y Cheng, H Yang, Z Chen, Y Lai. *Small* 13.48: 1701867 (2017). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sml.201701867>. Accessed 30 May 2025
- Zhao TY, Jones PR and Patankar NA. Sci Rep. Nature Publishing Group; 9:258 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36268-5>
- Lin Y, Chen H, Wang G and Liu A. Coatings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 8:208 (2018). <https://doi.org/10.3390/coatings8060208>
- Rønneberg S, He J and Zhang Z. Journal of Adhesion Science and Technology. 34:319–47 (2020). <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1679523>
- He Z, Xiao S, Gao H, He J and Zhang Z. Soft Matter. The Royal Society of Chemistry; 13:6562–8 (2017). <https://doi.org/10.1039/C7SM01511A>
- Rønneberg S, Laforte C, Volat C, He J and Zhang Z. AIP Advances. 9:055304 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5086242>
- Golovin K and Tuteja A. Science Advances. 3.9:e1701617 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701617>
- Jung S, Dorrestijn M, Raps D, Das A, Megaridis CM and Poulikakos D. Langmuir. American Chemical Society; 27:3059–66 (2011). <https://doi.org/10.1021/la104762g>
- Memon H, Wang J and Hou X. Materials (Basel). 16:4607 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16134607>
- Khammas R and Koivuluoto H. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 14:8422 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14148422>
- Nistal A, Sierra-Martín B and Fernández-Barbero A. Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 17:235 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17010235>
- Golovin K, Kobaku SPR, Lee DH, DiLoreto ET, Mabry JM and Tuteja A. Sci Adv. 2:e1501496 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501496>
- Rønneberg S, Zhuo Y, Laforte C, He J and Zhang Z. Coatings. 9:678 (2019). <https://doi.org/10.3390/coatings9100678>
- Mirshahidi K, Alasvand Zarasvand K, Luo W and Golovin K. HardwareX. 8:e00146 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00146>
- Peyman Irajizad, Abdullah Al-Bayati, Bahareh Eslami, Taha Shafquat, Masoumeh Nazari, Parham Jafari, Varun Kashyap, Ali Masoudi, Daniel Araya and Hadi Ghasemi. Mater Horiz. The Royal Society of Chemistry; 6:758–66 (2019). <https://doi.org/10.1039/C8MH01291A>
- Wood MJ, Brock G, Debray J, Servio P and Kietzig A-M. ACS Appl Mater Interfaces. American Chemical Society; 14:47310–21 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsami.2c16972>
- Kamran Alasvand Zarasvand, Amir Nazemi, Sudip Kumar Lahiri, Adam Tetreault, Abbas S. Milani, Timothy P. Bender and Kevin Golovin. Adv Funct Materials. 2023;33:2305517. <https://doi.org/10.1002/adfm.202305517>
- Hejazi V, Sobolev K and Nosonovsky M. Sci Rep. Nature Publishing Group; 3:2194 (2013). <https://doi.org/10.1038/srep02194>
- Mengling Ouyang, Ruisheng Guo, Yue Fan, Yi Zhou, Chengjiao Wu, Liwei Chen, Shilin Huang & Xuelin Tian. Nano Res. 16:589–98 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4746-z>
- Meuler AJ, Smith JD, Varanasi KK, Mabry JM, McKinley GH and Cohen RE. ACS Appl Mater Interfaces. American Chemical Society; 2:3100–10 (2010). <https://doi.org/10.1021/am1006035>
- Cohen N, Dotan A, Dodiuk H and Kenig S. Langmuir. American Chemical Society; 32:9664–75 (2016). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02495>
- Lv Y, Hu Q, Kang S, Leng Y, Sun P and Jiang X. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 727:138192 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138192>
- Work A and Lian Y. Progress in Aerospace Sciences. 98:1–26 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.001>
- Emelyanenko KA, Emelyanenko AM and Boinovich LB. Coatings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 10:648 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10070648>
- Schulz M and Sinapius M. 01–2135 (2015). <https://doi.org/10.4271/2015-01-2135>
- Chen D, Gelenter MD, Hong M, Cohen RE and McKinley GH. ACS Appl Mater Interfaces. 9:4202–14 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13773>
- Bleszynski M, Woll R, Middleton J and Kumosa M. Polymer Degradation and Stability. 166:272–82 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.005>
- Zaid A. Janjua, Barbara Turnbull, Kwang-Leong Choy, Christos Pandis, Junpeng Liu, Xianghui Hou and Kwing-So Choi. Applied Surface Science. 407:555–64 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.206>
- Jian Gao, Yifan Zhang, Wei Wei, Yuan Yin, Meihua Liu, Hao Guo, Chunbai Zheng and Pengyang Deng. ACS Appl Mater Interfaces. 2019;11:47545–52. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16181>
- He R, Xu L, Wang W, Shi J and Chen Z. Sci Rep. Nature Publishing Group; 15:18577 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03538-y>
- Cui J, Jiang D, Xing Z and Yang G. Case Studies in Thermal Engineering. 65:105620 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105620>
- Wu D, Ma L, Zhang F, Qian H, Minhas B, Yang Y, et Han X and Zhang D. Materials & Design. 185:108236 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108236>
- Qian H, Liu B, Wu D, Zhang F, Wang X, Jin L, Wang J, Zhang D and Li X. Surface and Coatings Technology. 406:126742 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126742>

40. Wei J, Yang S, Xiao X and Wang J. *Langmuir*. American Chemical Society; 40:7747–59 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00440>
41. Cheng T, He R, Zhan X, Zhang Q and Chen F. *J Mater Chem A*. The Royal Society of Chemistry; 3:21637–46 (2015). <https://doi.org/10.1039/C5TA05277G>
42. Liu Y, Tian Y, Chen J, Gu H, Liu J, Wang R, Zhang B, Zhang H and Zhang Q. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 588:124384 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124384>
43. Zhang J, Liu B, Tian Y, Wang F, Chen Q, Zhang F, Qian H and Ma L. *Coatings*. 10:119 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10020119>
44. Mohseni M, Recla L, Mora J, Gallego PG, Agüero A and Golovin K. *ACS Appl Mater Interfaces*. 13:36517–26 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08740>
45. Jellinek HHG. *Can J Phys*. NRC Research Press; 40:1294–309 (1962). <https://doi.org/10.1139/p62-138>
46. Ford TF. Defense Technical Information Center; 1962.
47. Haehnel, R. B., & Mulherin, N. D. *Ice in Surface Waters, Shen, Rotterdam*, vol 1, p. 597-604 (1998).
48. Bleszynski M and Clark E. Standards. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 1:117–33 (2021). <https://doi.org/10.3390/standards1020011>
49. Raraty LE, Tabor D. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*. 245:184–201 (1958). <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0076>
50. Koivuluoto H, Stenroos C, Kylmälahti M, Apostol M, Kiilakoski J and Vuoristo P. *J Therm Spray Tech*. 26:150–60 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0501-x>
51. C. Laforte and A. Beisswenger. *Materials Science. In Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWALS, Montreal, QC, Canada* (pp. 12-16) (2005).
52. Koivuluoto H, Stenroos C, Ruohomaa R, Bolelli G, Lusvarghi L and Vuoristo P. *Proceedings of the International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWALS), Uppsala, Sweden*. Vol. 28. (2015).
53. Jamil MI, Wang Q, Ali A, Hussain M, Aziz T, Zhan X and Zhang Q. *J Bionic Eng*. 18:548–58 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0046-7>
54. Dotan A, Dodiuk H, Laforte C and Kenig S. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 23:1907–15 (2009). <https://doi.org/10.1163/016942409X12510925843078>
55. Guerin F, Laforte C, Farinas M-I and Perron J. *Cold Regions Science and Technology*. 121:93–9 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.011>
56. Douglass, R. G., Palacios, J., & Schneeberger, G. *Atmospheric and Space Environments Conference* p. 3342 (2018). <https://doi.org/10.2514/6.2018-3342>
57. Scavuzzo RJ, Chu ML. [Internet]. Report No.: NASA-CR-179580 (1987). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19870008688>
58. Dannenberg H. *Journal of Polymer Science*. 33126:509-10 (1958). <https://doi.org/10.1002/app.1961.070051401>
59. Yin Y, Dang R, Wu D, Li M, Li Y and Gao H. *Carbon*. 229:119495 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119495>
60. Cao Z, Wang P, Gao W, Tao L, Suk JW, Ruoff RS, Akinwande D, Huang R and Liechti K. M. *Carbon*. 69:390–400 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.041>
61. Wu H, Zhu S, Dai C, Chi Y, Lin C and Zhang Y. *Journal of Manufacturing Processes*. 126:141–53 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.125>
62. Ehsani H, Boyd JD, Wang J and Grady ME. *Adhesion Measurement*. *Appl Mech Rev*. 73:030802 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4050700>
63. Kobayashi A, Jain A, Gupta V and Kireev V. *Vacuum*. 73:533–9 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2003.12.084>
64. Saletti D, Georges D, Gouy V, Montagnat M and Forquin P. *International Journal of Impact Engineering*. 132:103315 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103315>
65. Boinovich LB, Emelyanenko KA and Emelyanenko AM. *Journal of Colloid and Interface Science*. 606:556–66 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.030>
66. Boinovich LB, Emelyanenko AM, Emelyanenko KA and Modin EB. *ACS Nano*. American Chemical Society; 13:4335–46 (2019). <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09549>
67. H. Idriss, O. Guselnikova, P. Postnikov, Z. Kolska, P. Haušild, J. Čech, O. Lyutakov and V. Švorčík. *ACS Appl Polym Mater*. American Chemical Society; 2020;2:977–86. <https://doi.org/10.1021/acsapm.9b01185>
68. Chen J, Liu J, He M, Li K, Cui D, Zhang Q, Zeng X, Zhang Y, Wang J and Song Y. *Appl Phys Lett*. AIP Publishing; 101.11:111603 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4752436>
69. Wang Y, Zhang J, Dodiuk H, Kenig S, Ratto JA, Barry C, Turkoglu S and Mead J. *Cold Regions Science and Technology*. 201:103623 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103623>
70. Wang Y, Zhang J, Dodiuk H, Kenig S, Ratto JA, Barry C and Mead J. *coatings*. *J Coat Technol Res*. 20:469–83 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00682-2>
71. Ling EJY, Uong V, Renault-Crispo J-S, Kietzig A-M and Servio P. *ACS Appl Mater Interfaces*. American Chemical Society; 8:8789–800(2016). <https://doi.org/10.1021/acsami.6b00187>
72. Davis A, Yeong YH, Steele A, Bayer IS and Loth E. *ACS Appl Mater Interfaces*. American Chemical Society; 6:9272–9 (2014). <https://doi.org/10.1021/am501640h>
73. Wang J, Wu M, Liu J, Xu F, Hussain T, Scotchford C and Hou X. *Journal of Colloid and Interface Science*. 587:47–55 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.027>
74. Heydarian S, Jafari R, Momen G. *Progress in Organic Coatings*. 151:106096 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106096>
75. S. Aghdam A and Cebeci FÇ. *Langmuir*. American Chemical Society; 36:14145–54 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02873>
76. Aktaş B, Jafari R and Koivuluoto H. *J Therm Spray Tech*. 34:1843–54 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11666-025-01989-3>

References

1. Makkonen L. *Journal of Adhesion Science and Technology*. Taylor & Francis; 26: 413–45 (2012). <https://doi.org/10.1163/016942411X574583>
2. DIAKITE, D. A., and NOVIKOV, A. A. *Revue Internationale du Chercheur*, 6, 2, 1247 1275 (2025). DOI: 10.5281/zenodo.15733137.
3. Zhang F, Yan H, Chen M. *Small*. 20: e2312226 (2024). <https://doi.org/10.1002/smll.202312226>
4. Huang W, Huang J, Guo Z and Liu W. *Adv Colloid Interface Sci*. 304:102658 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102658>
5. Laforte C. – Université du Québec à Chicoutimi, (2001). <https://doi.org/10.1522/12599107>
6. Sanjay S. Latthe, Rajaram S. Sutar, Appasaheb K. Bhosale, Saravanan Nagappan, Chang-Sik Ha, Kishor Kumar Sadasivuni, Shanhu Liu and Ruimin Xing. *Progress in Organic Coatings*. 137:105373 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105373>
7. S Zhang, J Huang, Y Cheng, H Yang, Z Chen, Y Lai. *Small* 13.48: 1701867 (2017). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smll.201701867>. Accessed 30 May 2025
8. Zhao TY, Jones PR and Patankar NA. *Sci Rep*. Nature Publishing Group; 9:258 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36268-5>

9. Lin Y, Chen H, Wang G and Liu A. Coatings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 8:208 (2018). <https://doi.org/10.3390/coatings8060208>
10. Rønneberg S, He J and Zhang Z. Journal of Adhesion Science and Technology. 34:319–47 (2020). <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1679523>
11. He Z, Xiao S, Gao H, He J and Zhang Z. Soft Matter. The Royal Society of Chemistry; 13:6562–8 (2017). <https://doi.org/10.1039/C7SM01511A>
12. Rønneberg S, Laforte C, Volat C, He J and Zhang Z. AIP Advances. 9:055304 (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5086242>
13. Golovin K and Tuteja A. Science Advances. 3.9:e1701617 (2017). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701617>
14. Jung S, Dorrestijn M, Raps D, Das A, Megaridis CM and Poulikakos D. Langmuir. American Chemical Society; 27:3059–66 (2011). <https://doi.org/10.1021/la104762g>
15. Memon H, Wang J and Hou X. Materials (Basel). 16:4607 (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16134607>
16. Khammas R and Koivuluoto H. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 14:8422 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14148422>
17. Nistal A, Sierra-Martín B and Fernández-Barbero A. Materials. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 17:235 (2024). <https://doi.org/10.3390/ma17010235>
18. Golovin K, Kobaku SPR, Lee DH, DiLoreto ET, Mabry JM and Tuteja A. Sci Adv. 2:e1501496 (2016). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501496>
19. Rønneberg S, Zhuo Y, Laforte C, He J and Zhang Z. Coatings. 9:678 (2019). <https://doi.org/10.3390/coatings9100678>
20. Mirshahidi K, Alasvand Zarasvand K, Luo W and Golovin K. HardwareX. 8:e00146 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00146>
21. Peyman Irajizad, Abdullah Al-Bayati, Bahareh Eslami, Taha Shafquat, Masoumeh Nazari, Parham Jafari, Varun Kashyap, Ali Masoudi, Daniel Araya and Hadi Ghasemi. Mater Horiz. The Royal Society of Chemistry; 6:758–66 (2019). <https://doi.org/10.1039/C8MH01291A>
22. Wood MJ, Brock G, Debray J, Servio P and Kietzig A-M. ACS Appl Mater Interfaces. American Chemical Society; 14:47310–21 (2022). <https://doi.org/10.1021/acsami.2c16972>
23. Kamran Alasvand Zarasvand, Amir Nazemi, Sudip Kumar Lahiri, Adam Tetreault, Abbas S. Milani, Timothy P. Bender and Kevin Golovin. Adv Funct Materials. 2023;33:2305517. <https://doi.org/10.1002/adfm.202305517>
24. Hejazi V, Sobolev K and Nosonovsky M. Sci Rep. Nature Publishing Group; 3:2194 (2013). <https://doi.org/10.1038/srep02194>
25. Mengling Ouyang, Ruisheng Guo, Yue Fan, Yi Zhou, Chengjiao Wu, Liwei Chen, Shilin Huang & Xuelin Tian. Nano Res. 16:589–98 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4746-z>
26. Meuler AJ, Smith JD, Varanasi KK, Mabry JM, McKinley GH and Cohen RE. ACS Appl Mater Interfaces. American Chemical Society; 2:3100–10 (2010). <https://doi.org/10.1021/am1006035>
27. Cohen N, Dotan A, Dodiuk H and Kenig S. Langmuir. American Chemical Society; 32:9664–75 (2016). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02495>
28. Lv Y, Hu Q, Kang S, Leng Y, Sun P and Jiang X. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 727:138192 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.138192>
29. Work A and Lian Y. Progress in Aerospace Sciences. 98:1–26 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.001>
30. Emelyanenko KA, Emelyanenko AM and Boinovich LB. Coatings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 10:648 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10070648>
31. Schulz M and Sinapius M. 01–2135 (2015). <https://doi.org/10.4271/2015-01-2135>
32. Chen D, Gelenter MD, Hong M, Cohen RE and McKinley GH. ACS Appl Mater Interfaces. 9:4202–14 (2017). <https://doi.org/10.1021/acsami.6b13773>
33. Bleszynski M, Woll R, Middleton J and Kumosa M. Polymer Degradation and Stability. 166:272–82 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.005>
34. Zaid A, Janjua, Barbara Turnbull, Kwang-Leong Choy, Christos Pandis, Junpeng Liu, Xianghui Hou and Kwing-So Choi. Applied Surface Science. 407:555–64 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.206>
35. Jian Gao, Yifan Zhang, Wei Wei, Yuan Yin, Meihua Liu, Hao Guo, Chunbai Zheng and Pengyang Deng. ACS Appl Mater Interfaces. 2019;11:47545–52. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16181>
36. He R, Xu L, Wang W, Shi J and Chen Z. Sci Rep. Nature Publishing Group; 15:18577 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-03538-y>
37. Cui J, Jiang D, Xing Z and Yang G. Case Studies in Thermal Engineering. 65:105620 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105620>
38. Wu D, Ma L, Zhang F, Qian H, Minhas B, Yang Y, et Han X and Zhang D. Materials & Design. 185:108236 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108236>
39. Qian H, Liu B, Wu D, Zhang F, Wang X, Jin L, Wang J, Zhang D and Li X. Surface and Coatings Technology. 406:126742 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126742>
40. Wei J, Yang S, Xiao X and Wang J. Langmuir. American Chemical Society; 40:7747–59 (2024). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c00440>
41. Cheng T, He R, Zhan X, Zhang Q and Chen F. J Mater Chem A. The Royal Society of Chemistry; 3:21637–46 (2015). <https://doi.org/10.1039/C5TA05277G>
42. Liu Y, Tian Y, Chen J, Gu H, Liu J, Wang R, Zhang B, Zhang H and Zhang Q. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 588:124384 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124384>
43. Zhang J, Liu B, Tian Y, Wang F, Chen Q, Zhang F, Qian H and Ma L. Coatings. 10:119 (2020). <https://doi.org/10.3390/coatings10020119>
44. Mohseni M, Recla L, Mora J, Gallego PG, Agüero A and Golovin K. ACS Appl Mater Interfaces. 13:36517–26 (2021). <https://doi.org/10.1021/acsami.1c08740>
45. Jellinek HHG. Can J Phys. NRC Research Press; 40:1294–309 (1962). <https://doi.org/10.1139/p62-138>
46. Ford TF. Defense Technical Information Center; 1962.
47. Haehnel, R. B., & Mulherin, N. D. *Ice in Surface Waters, Shen, Rotterdam*, vol 1, p. 597-604 (1998).
48. Bleszynski M and Clark E. Standards. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 1:117–33 (2021). <https://doi.org/10.3390/standards1020011>
49. Raraty LE, Tabor D. Proceedings of the Royal Society of London Series A. 245:184–201 (1958). <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0076>
50. Koivuluoto H, Stenroos C, Kylmälahti M, Apostol M, Kiilakoski J and Vuoristo P. J Therm Spray Tech. 26:150–60 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0501-x>
51. C. Laforte and A. Beisswenger. Materials Science. In *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, IWAIS, Montreal, QC, Canada* (pp. 12-16) (2005).
52. Koivuluoto H, Stenroos C, Ruohomaa R, Bolelli G, Lusvarghi L and Vuoristo P. *Proceedings of the International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IW AIS), Uppsala, Sweden*. Vol. 28. (2015).
53. Jamil MI, Wang Q, Ali A, Hussain M, Aziz T, Zhan X and Zhang Q. J Bionic Eng. 18:548–58 (2021). <https://doi.org/10.1007/s42235-021-0046-7>

54. Dotan A, Dodiuk H, Laforte C and Kenig S. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 23:1907–15 (2009). <https://doi.org/10.1163/016942409X12510925843078>
55. Guerin F, Laforte C, Farinas M-I and Perron J. *Cold Regions Science and Technology*. 121:93–9 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.10.011>
56. Douglass, R. G., Palacios, J., & Schneeberger, G. *Atmospheric and Space Environments Conference* p. 3342 (2018). <https://doi.org/10.2514/6.2018-3342>
57. Scavuzzo RJ, Chu ML. [Internet]. Report No.: NASA-CR-179580 (1987). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19870008688>
58. Dannenberg H. *Journal of Polymer Science*. 33126:509-10 (1958). <https://doi.org/10.1002/app.1961.070051401>
59. Yin Y, Dang R, Wu D, Li M, Li Y and Gao H. *Carbon*. 229:119495 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.119495>
60. Cao Z, Wang P, Gao W, Tao L, Suk JW, Ruoff RS, Akinwande D, Huang R and Liechti K. M. *Carbon*. 69:390–400 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.12.041>
61. Wu H, Zhu S, Dai C, Chi Y, Lin C and Zhang Y. *Journal of Manufacturing Processes*. 126:141–53 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.07.125>
62. Ehsani H, Boyd JD, Wang J and Grady ME. *Adhesion Measurement. Appl Mech Rev*. 73:030802 (2021). <https://doi.org/10.1115/1.4050700>
63. Kobayashi A, Jain A, Gupta V and Kireev V. *Vacuum*. 73:533–9 (2004). <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2003.12.084>
64. Saletti D, Georges D, Gouy V, Montagnat M and Forquin P. *International Journal of Impact Engineering*. 132:103315 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103315>
65. Boinovich LB, Emelyanenko KA and Emelyanenko AM. *Journal of Colloid and Interface Science*. 606:556–66 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.08.030>
66. Boinovich LB, Emelyanenko AM, Emelyanenko KA and Modin EB. *ACS Nano*. American Chemical Society; 13:4335–46 (2019). <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09549>
67. H. Idriss, O. Guselnikova, P. Postnikov, Z. Kolska, P. Haušild, J. Čech, O. Lyutakov and V. Švorčík. *ACS Appl Polym Mater*. American Chemical Society; 2020;2:977–86. <https://doi.org/10.1021/acsapm.9b01185>
68. Chen J, Liu J, He M, Li K, Cui D, Zhang Q, Zeng X, Zhang Y, Wang J and Song Y. *Appl Phys Lett*. AIP Publishing; 101.11:111603 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4752436>
69. Wang Y, Zhang J, Dodiuk H, Kenig S, Ratto JA, Barry C, Turkoglu S and Mead J. *Cold Regions Science and Technology*. 201:103623 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103623>
70. Wang Y, Zhang J, Dodiuk H, Kenig S, Ratto JA, Barry C and Mead J. *coatings. J Coat Technol Res*. 20:469–83 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11998-022-00682-2>
71. Ling EJY, Uong V, Renault-Crispo J-S, Kietzig A-M and Servio P. *ACS Appl Mater Interfaces*. American Chemical Society; 8:8789–800(2016). <https://doi.org/10.1021/acsmi.6b00187>
72. Davis A, Yeong YH, Steele A, Bayer IS and Loth E. *ACS Appl Mater Interfaces*. American Chemical Society; 6:9272–9 (2014). <https://doi.org/10.1021/am501640h>
73. Wang J, Wu M, Liu J, Xu F, Hussain T, Scotchford C and Hou X. *Journal of Colloid and Interface Science*. 587:47–55 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.027>
74. Heydarian S, Jafari R, Momen G. *Progress in Organic Coatings*. 151:106096 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.106096>
75. S. Aghdam A and Cebeci FÇ. *Langmuir*. American Chemical Society; 36:14145–54 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c02873>
76. Aktaş B, Jafari R and Koivuluoto H. *J Therm Spray Tech*. 34:1843–54 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11666-025-01989-3>

© Д. А. Дняките – аспирант кафедры Физической и коллоидной химии (ФКХ), факультета Химической технологии и экологии (ХТЭ), Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина (РГУ им. И.М. Губкина), Москва, Россия, daoudaassadiakite@gmail.com; А. А. Новиков – к.х.н., Доцент кафедры ФКХ, факультета ХТЭ, РГУ им. И.М. Губкина, novikov.a@gubkin.ru.

© D. A. Diakite – PhD-student, Department of Physical and Colloid Chemistry (PCC), Faculty of Chemical Technology and Ecology (CTE), Gubkin Russian State University of Oil and Gas (Gubkin SU), Moscow, Russia, daoudaassadiakite@gmail.com; A. A. Novikov – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of PCC, Faculty of CTE, Gubkin SU, novikov.a@gubkin.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 03.12.25.

Дата принятия рукописи в печать – 25.12.25.