

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110

## ПРИМЕНЕНИЕ И МОДИФИКАЦИЯ ЧАСТИЦ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ (обзор)

С.А. Марченко<sup>1</sup>, В.Г. Железняк<sup>1</sup>, В.А. Кузнецова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Супергидрофобные полимерные покрытия вызывают значительный интерес к их промышленному применению, а развитие нанотехнологии упростило разработку и изготовление нанотекстурированных супергидрофобных покрытий. В настоящее время для получения большинства супергидрофобных покрытий неотъемлемым условием является присутствие в его составе функциональных частиц/наночастиц, а главная проблема таких покрытий – низкая стабильность, которая влияет на их практическое применение. Обзор посвящен анализу последних тенденций в области применения микро- и наночастиц для формирования супергидрофобных покрытий, модификации частиц и способов ввода их в покрытие.

**Ключевые слова:** супергидрофобность, функциональные частицы, наночастицы, диоксид кремния, оксид алюминия, графен

**Для цитирования:** Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Применение и модификация частиц для создания супергидрофобных покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 5 (123). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.

Scientific article

## APPLICATION AND MODIFICATION OF PARTICLES TO CREATE SUPERHYDROPHOBIC COATINGS (review)

S.A. Marchenko<sup>1</sup>, V.G. Zheleznyak<sup>1</sup>, V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Superhydrophobic polymer coatings arouse considerable interest in their industrial application, and the development of nanotechnology has simplified the development and production of nanotextured superhydrophobic coatings. Currently, the presence of functional particles/nanoparticles in its composition is a prerequisite for obtaining most superhydrophobic coatings, and the main problem of such coatings is low stability, which affects their practical application. The review is devoted to the analysis of the latest trends in the use of micro- and nanoparticles for the formation of superhydrophobic coatings, modification of particles and methods of their introduction into the coating.

**Keywords:** superhydrophobicity, functional particles, nanoparticles, silicon dioxide, aluminium oxide, graphene

**For citation:** Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Application and modification of particles to create superhydrophobic coatings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 5 (123), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-5-94-110.

### Введение

Супергидрофобность, определяемая контактным углом с поверхностью воды более 150 градусов и углом скольжения менее 10 градусов, является отличительной

способностью многих природных объектов. Например, ее можно наблюдать на крыльях бабочки [1], лепестках роз [2] и листьях лотоса [3], где исключительная водоотталкивающая способность достигается благодаря сочетанию материалов с низкой поверхностной энергией и высокой шероховатостью поверхности. Потенциально искусственные супергидрофобные покрытия можно использовать для получения таких свойств, как самоочистка [4–6], защита от обледенения [7–11], предотвращение запотевания [12, 13], защита от коррозии [14–16] и т. д. Разрабатываются супергидрофобные поверхности, обладающие механической прочностью [17, 18], хорошей адгезией к подложке [19] и химической стойкостью [20].

В последние десятилетия созданы разнообразные подходы для получения супергидрофобных покрытий:

– *золь-гель метод* подходит для получения высококачественных супергидрофобных покрытий с хорошей термостойкостью, хотя и имеет несколько недостатков, связанных с трещиностойкостью и ограничениями по толщине, а термическая обработка может привести к ухудшению состояния подложек. Золь-гель процесс обычно используется для производства полимерных органических материалов, однако в случае полимеризации минералов используются молекулярные прекурсоры в растворителе (спирте или воде), которые постепенно трансформируются в трехмерную сеть. Этот процесс позволяет наносить супергидрофобные покрытия на различные подложки, включая металлы, дерево, стекло и керамику. В настоящее время этот метод широко используется для получения супергидрофобных нанопокровов [21, 22];

– *химическое и физическое травление* может увеличить шероховатость поверхности, создавая определенный микрорельеф. Супергидрофобность достигается либо сразу, либо требуется последующая обработка гидрофобизатором, в зависимости от природы субстрата [23, 24];

– *метод погружения* широко используется для приготовления покрытий на основе наноматериалов. Обычно он состоит из двух этапов – замачивание подложки в растворе, содержащем наночастицы, и ее вытягивание вверх с постоянной и контролируемой скоростью, благодаря чему контролируется толщина покрытия. После удаления из раствора подложка с покрытием обрабатывается гидрофобизатором [25];

– *химическое и электроосаждение* – традиционный и недорогой метод создания тонкого слоя металлов или металлических сплавов с желаемой структурой. Метод позволяет получать стабильные покрытия заданной толщины. В случае полимерных материалов мономер окисляется в электрохимической ячейке и полимеризуется на поверхности электрода. Текстуру покрытия можно изменять с помощью продолжительности осаждения и величины тока [26–28].

Существуют и другие методы нанесения супергидрофобных покрытий: распыление, химическое осаждение из паровой фазы, центрифугирование, фотохимические методы, литография и электропрядение [29]. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Например, *метод распыления* подходит для нанесения покрытий в промышленных масштабах, поэтому он используется в строительстве, для текстиля и стекла. При распылении сложно контролировать текстуру покрытия, поэтому контактный угол не будет достигать высоких значений, как при использовании других методов. Супергидрофобные покрытия, полученные *методами центрифугирования и литографии*, имеют заданную толщину и структуру шероховатости, однако эти методы подходят только для небольших поверхностей.

Главная проблема супергидрофобных покрытий – низкая механическая устойчивость, что является критическим фактором, влияющим на практическое применение. Например, супергидрофобные поверхности на основе таких веществ, как

TiO<sub>2</sub> [30] и SiO<sub>2</sub> [31], несмотря на превосходную механическую прочность, обладают низкой адгезией к подложке и чувствительны к химическим веществам. Супергидрофобные поверхности на органической основе, напротив, обладают хорошей адгезией [32], но плохими механическими свойствами.

В последнее время вышеописанную проблему разработчики решают тремя способами:

– супергидрофобным поверхностям можно придать функцию самовосстановления, имитируя способности живых организмов [33, 34]. После механического истирания поврежденную супергидрофобную поверхность можно «залечить» действием светового облучения, влажности и т. д.;

– механическая прочность может быть улучшена путем создания покрытия, которое имеет иерархическую супергидрофобную структуру не только на поверхности, но и на протяжении определенной глубины к подложке [35]. После того как верхний слой стирается под действием внешних факторов, открытая поверхность все еще имеет иерархическую супергидрофобную структуру;

– прочность сцепления может быть повышена за счет вставки армированного слоя (например, клеевого) между супергидрофобными покрытиями и подложками [36, 37]. Этот способ позволяет получать покрытия с высокой механической прочностью и считается наиболее многообещающим, однако такая сэндвич-структура все еще недостаточно прочная для применения на деталях, подвергаемых сильным механическим воздействиям. В этом случае средний клеевой слой оголяется, образуя гладкую поверхность, которая не может обеспечить необходимую для супергидрофобности шероховатость.

Объединяет большинство методов создания супергидрофобных покрытий неотъемлемое условие – присутствие в его составе функциональных частиц/наночастиц. Двойная шероховатость поверхности с микро- и наноструктурами, которые необходимы для супергидрофобности, может быть получена путем нанесения слоев наночастиц на поверхность и модификацией наночастиц гидрофобными фрагментами [38, 39].

В данном обзоре рассмотрены последние тенденции применения микро- и наночастиц для формирования супергидрофобных покрытий, модификации частиц и способов ввода их в покрытие.

### Диоксид кремния

Наночастицы кремнезема (SiO<sub>2</sub>) широко используются при создании супергидрофобных поверхностей и покрытий [40, 41] не только из-за их широкой коммерческой доступности и низкой стоимости, но и благодаря тому, что с их помощью можно изготовить прозрачные несмачиваемые наноразмерные покрытия [42]. Они также могут осаждаться из различных прекурсоров и превращаться в гидрофобные или олеофобные нанотекстурированные пленки путем силанизации [43]. Более удобный для промышленности подход заключается в нанесении гидрофобизированных наночастиц кремнезема методом распыления или окунания [44].

Существуют также исследования, в которых коллоидные суспензии наночастиц кремнезема подвергаются контролируемой агрегации в растворе, а покрытие получают методом центрифугирования, что помогает настроить оптические свойства пленок с наночастицами [45]. Хотя все эти способы нанесения покрытий с наночастицами очень перспективны [46], покрытия на их основе должны быть механически устойчивыми [47].

В работе [48] получено покрытие на основе гидрофобных наночастиц кремнезема, модифицированного гексаметилдисилазаном. Стабильную суспензию в тетрагидрофуране (ТГФ) гидрофобных наночастиц кремнезема получали обработкой

ультразвуком в течение 30 мин. На подложку наносили полиуретановую грунтовку (в качестве растворителя применяли ТГФ), чтобы улучшить адгезию между гидрофобным диоксидом кремния и подложкой (рис. 1).



Рис. 1. Схематическая структура покрытия, полученного многостадийным методом

В полученном покрытии кремнезем представлен в виде пористых агрегатов, которые позволяют улавливать небольшие воздушные карманы, тем самым препятствуя проникновению воды в покрытие. Угол смачивания такого покрытия равен 148 градусам.

Повышение износостойкости пленок описано в работе [49]. Наночастицы пирогенного диоксида кремния, модифицированные гексаметилдисилазаном, наносили на грунтовку из термопластичного полиуретана, которая покрыта тонким слоем графеновых нанопластинок (алюминиевая подложка). Термический отжиг при температуре 150 °С и слой графеновых нанопластинок повысили износостойкость пленок с наночастицами. Покрытие сохраняет супергидрофобные свойства после испытаний на стойкость к истиранию в течение 30 циклов под давлением 20 кПа.

Суперамфибобные поверхности (свойство веществ, обладающих одновременно лиофильными и лиофобными свойствами) с контактным углом более 150 градусов и низким углом скольжения как для воды, так и для жидкостей с низким поверхностным натяжением, получили значительное распространение в фундаментальных исследованиях и практических приложениях [50, 51]. Однако создание прочных суперамфибобных покрытий с высокой отталкивающей способностью по отношению к жидкостям с низким поверхностным натяжением и высокой вязкостью все еще остается сложной задачей. В работе [52] описан простой метод изготовления прочных суперамфибобных покрытий с высокой статической и динамической отталкивающей способностью к таким жидкостям. Вначале готовят гомогенную суспензию путем гидролитической конденсации силанов в присутствии цепочечных агрегатов наночастиц  $\text{SiO}_2$ . Затем суперамфибобные покрытия изготавливают путем распыления полиуретанового клея на подложки с последующим нанесением свежеприготовленной суспензии. Полученные покрытия обладают высокой отталкивающей способностью к жидкостям с низким поверхностным натяжением и высокой вязкостью, демонстрируют превосходную механическую стойкость к интенсивному истиранию наждачной бумагой (60 м истирания при давлении 10,5 кПа), воздействию струи воды при регулируемом давлении (60 мин при давлении 100 кПа) и отслаиванию клейкой ленты (200 циклов).

В работе [53] использованы гидрофобные наночастицы коллоидного  $\text{SiO}_2$ , обработанные диметилдихлорсиланом. Образцы подготавливали следующим образом: сначала наночастицы диоксида кремния диспергировали в этаноле и обрабатывали ультразвуком в течение 20 мин. В вышеуказанную суспензию добавляли силиконовый герметик и перемешивали в течение нескольких часов до образования гомогенной смеси. После нанесения на подложку покрытие выдерживали при комнатной температуре в течение 12 ч (рис. 2).



Рис. 2. Схема приготовления супергидрофобного покрытия

Композитное покрытие  $\text{SiO}_2$ /силикон показало хорошую водоотталкивающую способность, контактный угол – более 150 градусов, а угол скольжения – менее 10 градусов. Кроме того, получен самый высокий коэффициент пропускания света (мера прозрачности) для супергидрофобных покрытий, который составил 88,7 %. Результаты эксплуатационных испытаний показали, что супергидрофобное покрытие обладает хорошей механической стойкостью к каплям воды, а также превосходной химическо-термической стабильностью и УФ-стойкостью. Кроме того, данный способ получения супергидрофобных покрытий на различных подложках отличается простотой и экономичностью, что обеспечивает возможность его широкомасштабного промышленного применения.

Для улучшения гидрофобных свойств материалов вводимые в их состав частицы стали подвергать модифицированию (гидрофобизации). В работе [54] представлен способ получения фторированных наночастиц  $\text{SiO}_2$ . Сначала наночастицы  $\text{SiO}_2$  погружали в толуол и обрабатывали в ультразвуковой мельнице в течение 15 мин. Затем суспензию  $\text{SiO}_2$  переносили в реакционную колбу и при перемешивании добавляли перфторооктилтрихлорсилан. После интенсивного перемешивания при комнатной температуре в атмосфере азота в течение 24 ч полученную суспензию центрифугировали при скорости 10000 об/мин в течение 10 мин. Полученные наночастицы фторированного  $\text{SiO}_2$  сушили в вакуумной печи при температуре 80 °С в течение 6 ч.

В некоторых работах описано получение композитных частиц. Например, в работе [55] частицы  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  получали путем нанесения наночастиц  $\text{TiO}_2$  на поверхность микросфер аморфного  $\text{SiO}_2$ , которые затем модифицировали полидиметилсилоксаном для получения тройного соединения  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-PDMS}$ .

В исследовании [56] разработаны составы покрытий на основе наночастиц типа «ядро–оболочка» из диоксидов кремния и титана с полиуретановым связующим. Наночастицы «ядро–оболочка» синтезированы с целью использования, с одной стороны, механических свойств ядра кремнезема, а с другой – фотокаталитической активности тонкой оболочки диоксида титана. Диоксид кремния улучшает прочность и устойчивость к царапинам полиуретановой пленки, тогда как фотокаталитическая активность диоксида титана обеспечивает противоводорослевые свойства. Наночастицы кремнезема приготовлены с помощью золь-гель метода, а наночастицы  $\text{TiO}_2$  и наночастицы типа «ядро–оболочка» – в процессе пептизации.

### Графен и углеродные нанотрубки

В работе [6] представлен простой метод изготовления органического покрытия с супергидрофобной поверхностью на медной подложке. Жидкофазные фторграфеновые нанолиты (материал с низкой поверхностной энергией, представляющий собой смесь

частиц различных форм и размеров) пространственно фиксируют на поверхности покрытия из эпоксидной смолы для создания шероховатой поверхности со случайной микро/наноструктурой.

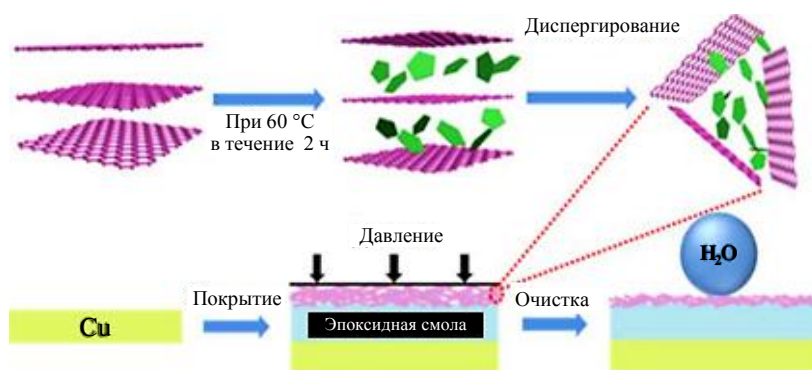


Рис. 3. Схема формирования супергидрофобного эпоксидного покрытия

На рис. 3 показана упрощенная схема процесса изготовления супергидрофобного покрытия, который состоит из двух этапов: нанесение эпоксидного слоя на медную подложку и фиксация наноллистов фторграфена на его (слоя) поверхности. Эпоксидное покрытие наносили на медную подложку методом погружения. Для улучшения адгезии фторграфена к эпоксидной смоле систему покрытий подвергали воздействию давления с помощью груза. Отверждение происходило при комнатной температуре в течение 48 ч, а незакрепившийся на поверхности фторграфен удаляли проточной деионизированной водой. Толщина подготовленного покрытия в основном составляла  $\sim(58\pm 5,6)$  мкм. Система покрытий демонстрирует превосходные защитные характеристики благодаря функции самоочистки, химической стабильности (как в кислых, так и в щелочных водных растворах) и устойчивости к механическому истиранию.

В работе [57] супергидрофобное покрытие получали путем смешивания эпоксидной смолы на основе диглицидилового эфира бисфенола А с немодифицированными многослойными углеродными нанотрубками. Смесь растворяли в ацетоне и наносили на поверхность углеродистой стали с помощью простого и эффективного метода одноэтапного распыления (рис. 4).

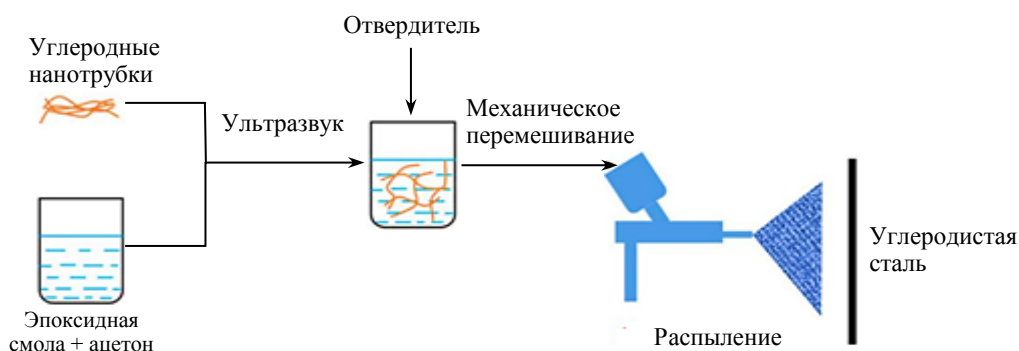


Рис. 4. Схематическое изображение метода получения нанокompозитных покрытий углеродные нанотрубки/эпоксидная смола

Наибольший контактный угол с водой достигал  $\sim 154$  градусов при добавлении 30 % углеродных нанотрубок в матрицу покрытия. Свежеприготовленное супергидрофобное нанокompозитное покрытие показало отличные антиобледенительные

свойства при испытаниях на капание воды и статическое замораживание при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а также механическую прочность. Супергидрофобное состояние покрытия сохранялось даже после 100 циклов при применении теста на отрыв липкой ленты.

В работе [58] синтезировали супергидрофобные покрытия на основе полиуретана с частицами кремнезема и углеродными нанотрубками, модифицированными перфтордецилтриэтоксисиланом. Супергидрофобные покрытия показали угол контакта  $154,3$  градуса, а угол скольжения – всего  $5$  градусов. Покрытия обладали высокой адгезией к алюминиевым подложкам. Несмотря на то что супергидрофобные покрытия оказались не стойки к УФ-повреждениям, водоотталкивающие свойства удавалось восстановить путем термообработки при температуре  $135\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение  $3$  ч.

### Каолин

Каолин – природный наноматериал, часто используемый для армирования полимеров из-за своих характеристик (высокая огнеупорность и низкая пластичность) и низкой стоимости, однако он редко применяется для создания многофункциональных супергидрофобных материалов [59, 60].

В работе [61] получены супергидрофобные частицы каолина. На первом этапе стеариновую кислоту растворяли в безводном этаноле при температуре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем ультразвуком диспергировали в растворе частицы каолина. Через  $20$  мин нагревали до температуры  $106\text{ }^{\circ}\text{C}$  и перемешивали в течение  $2$  ч магнитной мешалкой. После этого частицы собирали с помощью вакуумной фильтрации и сушили при температуре  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение  $2$  ч, получая супергидрофобные частицы каолина. Затем полученные частицы добавляли в смесь поливинилхлорида (ПВХ) и тетрагидрофурана (рис. 5).

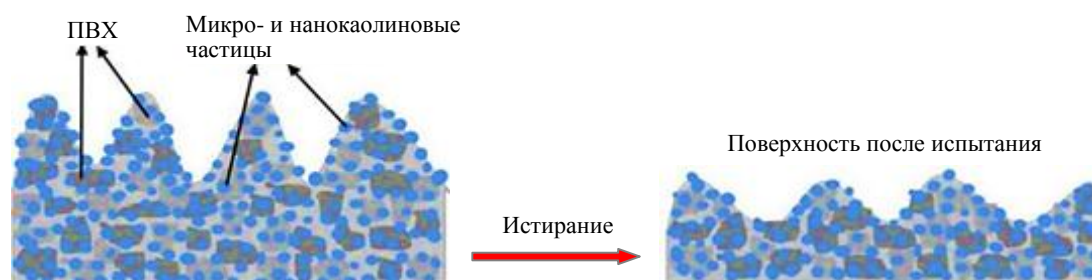


Рис. 5 Схематическое изображение противозносного механизма композиционного супергидрофобного материала, модифицированного частицами каолина в поливинилхлориде (ПВХ)

Покрытие сохраняет свою супергидрофобность после  $60$  циклов истирания наждачной бумагой с нагрузкой  $500$  г, семи дней УФ-облучения или  $120$ -минутного ультразвукового испытания. Превосходная стойкость к сложным условиям объясняется иерархической структурой и сильным межфазным сцеплением материалов.

### Оксид алюминия

В нескольких работах при изготовлении супергидрофобных покрытий, где суспензии наночастиц наносят/распыляют на свежую краску на основе эпоксидной смолы, приведены сведения об использовании дисперсий оксида алюминия.

В работе [62] приготовлено двухслойное покрытие, состоящее из нижнего слоя не полностью отвержденной эпоксидной смолы, модифицированной силаном на основе глицидоксипропила и перфтордецила, и верхнего слоя, содержащего суспензию оксида алюминия и модифицированную эпоксидную смолу.

Двухслойные покрытия с высокими гидрофобными характеристиками успешно получены в работе [63] путем нанесения наночастиц оксида алюминия, модифицированных стеариновой кислотой, на подслоу на основе эпоксидной смолы. Суспензия функционализированных наночастиц оксида алюминия в 2-пропанолу наносили методом распыления на подложку из нержавеющей стали, предварительно покрытую двумя различными частично отвержденными покрытиями на основе эпоксидных смол: DGEBA и Novolac Type II. Результаты показали, что покрытия на основе смолы DGEBA с функционализированными наночастицами оксида алюминия обладают контактными углами  $>139,9$  градуса. Модифицированное оксидом алюминия покрытие Novolac Type II показало сильную адгезию капель воды к поверхности, характерной для состояния Венцеля, что связано с другими наполнителями, присутствующими в коммерческой смоле.

### **Карбонат кальция**

Работа [64] посвящена простому способу приготовления супергидрофобного покрытия на основе полидиметилсилоксана/ $\text{CaCO}_3$ . Полидиметилсилоксан разбавляли в этилацетате и перемешивали раствор с помощью магнитной мешалки. Затем к вышеуказанному раствору добавляли наночастицы  $\text{CaCO}_3$  и перемешивали в течение приблизительно 4–5 мин. После этого последовательно добавляли дибутилоловодилаурат и этилсиликат с последующим перемешиванием в течение еще 10 мин. Небольшое количество полученной смеси капали на стеклянные подложки, при медленном наклоне смесь растекалась и равномерно покрывала подложку. После высыхания смеси на подложке получено супергидрофобное покрытие. Угол контакта с водой и угол скольжения на поверхности покрытия могли достигать 160 и 3 градусов соответственно. В работе протестированы устойчивость супергидрофобного покрытия к механическому сдвигу и адгезионная прочность. Результаты показали, что поверхность покрытия стабильна.

Способ модификации карбоната кальция описан в работе [65]. Водный раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  энергично перемешивали в деионизированной воде в течение 30 мин во флаконе, снабженном холодильником, капельной воронкой и подводом азота. Олеиновую, стеариновую, линоленовую или эпоксицированную олеиновую кислоты в различных концентрациях растворяли в этаноле, а затем добавляли по каплям к раствору  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при интенсивном перемешивании. Бикарбонат аммония нагревали в закрытой колбе и добавляли в реакционный сосуд для образования пузырьков  $\text{CO}_2$  до тех пор, пока показатель pH раствора не достигал 7. Растворы карбоната кальция подвергали центрифугированию при скорости 10000 об/мин в течение 30 мин для отделения наноматериалов, которые затем промывали несколько раз этанолом и разделяли с помощью ультрацентрифугирования.

### **Диатомит**

Вредность для окружающей среды и недостаточная механическая прочность фторированных химикатов стали основными препятствиями для их практического применения. Новой тенденцией в разработке супергидрофобных покрытий является экологичность, этому способствует использование в составе материала минералов. В работе [66] представлено сверхпрочное и нефторированное супергидрофобное покрытие (рис. 6). Его получали смешиванием диатомита, песчаного порошка и триэтоксиктилсилана, смесь которых постепенно добавляли в воду. Затем раствор механически перемешивали и добавляли портландцемент, образовывалась суспензия, похожая на краску. Диатомит вместе с песчаным порошком образовывали иерархическую структуру, которая дополнительно скреплена портландцементом для

повышения прочности. Для получения низкой поверхностной энергии покрытия в его составе присутствует нефторированный триэтоксиктилсилан на водной основе. В частности, свежеприготовленный образец выдерживал истирание наждачной бумагой в течение 18 м при давлении 24 кПа, отслаивание липкой ленты 80 раз при давлении 24 кПа и термообработку при температуре 150 °С в течение 24 ч без потери супергидрофобности. Кроме того, этот супергидрофобный материал обладает превосходными свойствами самоочистки.

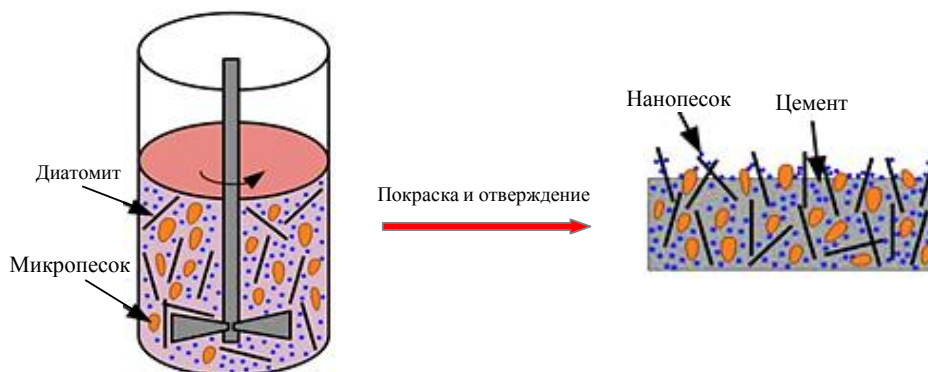


Рис. 6. Схематическое изображение получения нефторированного супергидрофобного покрытия

### Нанотрубки галлуазита

Нанотрубки из алюмосиликатной глины, известные как галлуазитовые нанотрубки (ГНТ), могут использоваться в качестве основы для хранения ингибиторов коррозии и контроля высвобождения ингибирующих частиц [67], для изготовления высокопрочных полимерных композитов [68], а также ГНТ могут служить контейнером для синтеза наногидрогелей на основе неорганических обратных мицелл (мицелла, в которой гидрофильные группы формируют ядро, а гидрофобные – внешнюю оболочку) для промышленного и биологического применения [69].

В исследовании [70] супергидрофобное покрытие с превосходными механическими свойствами получено путем распыления смеси полисилоксановых смол на основе трех силоксановых мономеров, модифицированных гексадецилтриметоксисиланом наночастиц  $\text{SiO}_2$ , и галлуазитовых нанотрубок, модифицированных полистиролом. Покрытие продемонстрировало превосходную устойчивость к обрастанию, кислотной и щелочной коррозии, а контактный угол покрытия после 90 циклов истирания оставался более 150 градусов.

### Оксид цинка

Исследование, представленное в работе [71], сосредоточено на новом подходе к двухслойному покрытию для изготовления термостойкого, стойкого к истиранию, многофункционального, супергидрофобного покрытия посредством химической связи полиуретана на основе карданола, модифицированного полидиметилсилоксаном с концевыми гидроксильными группами, и наночастиц  $\text{ZnO}$  с привитым на поверхность силаном на границе раздела фаз. Полученное супергидрофобное покрытие показало высокий краевой угол смачивания 151 градус и гистерезис краевого угла 7 градусов, которые после 10 циклов истирания изменились до 133 и 12 градусов соответственно. Силановые группы на поверхности позволяют частицам  $\text{ZnO}$  равномерно диспергироваться и проникать сквозь полимерное покрытие, формируя морфологию микро/наномасштаба.

### Заключения

Супергидрофобные покрытия имеют большой потенциал для промышленного применения, поэтому им уделяется большое внимание. Ожидается, что благодаря их особым свойствам, включая самоочищение, защиту от запотевания, снижение аэродинамического сопротивления, коррозионную стойкость, антиобледенительные и ледофобные свойства, области их применения в будущем будут расширяться. Развитие нанотехнологий упростило проектирование и изготовление нанотекстурированных супергидрофобных покрытий на поверхностях, однако адгезия к подложке, механическая долговечность и сложность процесса нанесения по-прежнему остаются проблемой для применения таких покрытий в промышленности. В связи с этим большинство методов создания супергидрофобных покрытий основаны на распылении наночастиц, диспергированных в различных средах. Микро- и наночастицы улучшают механическую прочность и создают необходимую микроструктуру на поверхности покрытия (в большинстве случаев используют диоксид кремния из-за его способности создавать поверхностные структуры). В последнее время появляется все больше различных супергидрофобных материалов, неотъемлемой частью большинства из которых являются микро- и наночастицы.

В данной работе рассмотрены последние тенденции в области применения микро- и наночастиц, их модификации в результате гидрофобизации, совместного применения с другими частицами, а также использования различных способов встраивания их в полимерную матрицу для формирования супергидрофобных покрытий.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ».

### Список источников

1. Zheng Y., Gao X., Jiang L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings // *Soft Matter Journal*. 2007. Vol. 3. P. 178–182.
2. Xi J., Jiang L. Biomimic superhydrophobic surface with high adhesive forces // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2008. Vol. 47 (17). P. 6354–6357.
3. Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces // *Planta*. 1997. Vol. 202. P. 1–8.
4. Ren T., He J. Substrate-versatile approach to robust antireflective and superhydrophobic coatings with excellent self-cleaning property in varied environments // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2017. Vol. 9 (39). P. 34367–34376.
5. Ma X., Shen B., Zhang L. et al. Porous superhydrophobic polymer/carbon composites for lightweight and self-cleaning EMI shielding application // *Composites Science and Technology*. 2018. Vol. 158. P. 86–93.
6. Yang Z., Wang L., Sun W., Liu G. Superhydrophobic epoxy coating modified by fluorographene used for anti-corrosion and self-cleaning // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 401. P. 146–155.
7. Liu Y., Bai Y., Jin J. et al. Facile fabrication of biomimetic superhydrophobic surface with anti-frosting on stainless steel substrate // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 355. P. 1238–1244.
8. Liu Y., Li X., Jin J. et al. Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 400. P. 498–505.
9. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. Научно-технические проблемы освоения Арктики. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
10. Бузник В.М., Каблов Е.Н. Технологии получения и адаптации материалов для применения в Арктике // Тез. докл. сателлитной V Междунар. конф.-школы по химической технологии XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Волгоград: Волгоградск. гос. техн. ун-т, 2016. С. 9–10.

11. Беспалов А.С., Нефедов Н.И., Деев И.С., Куршев Е.В., Лонский С.Л., Бузник В.М. Особенности гидрофобизации высокопористых керамических материалов с помощью фторолигомеров // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-41-51.
12. Yin K., Du H., Dong X. et al. A simple way to achieve bioinspired hybrid wettability surface with micro/nanopatterns for efficient fog collection // *Nanoscale*. 2017. Vol. 9. P. 14620–14626.
13. Sun Z., Liao T., Liu K. et al. Fly-Eye Inspired superhydrophobic anti-fogging inorganic nanostructures // *Small*. 2014. Vol. 10. P. 3001–3006.
14. Ou J., Hu W., Xue M. et al. Superhydrophobic surfaces on light alloy substrates fabricated by a versatile process and their corrosion protection // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2013. Vol. 5. P. 3101–3107.
15. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 2 (35). С. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
16. Варченко Е.А., Курс М.Г. Щелевая коррозия алюминиевых сплавов и нержавеющей сталей в морской воде // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105.
17. Chen X., Gong Y., Suo X. et al. Construction of mechanically durable superhydrophobic surfaces by thermal spray deposition and further surface modification // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 356. P. 639–644.
18. Tesler A.B., Kim P., Kolle S. et al. Extremely durable biofouling-resistant metallic surfaces based on electrodeposited nanoporous tungstite films on steel // *Nature communications*. 2015. Vol. 6. P. 8649.
19. Tan C., Cai P., Xu L. et al. Fabrication of superhydrophobic surface with controlled adhesion by designing heterogeneous chemical composition // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 349. P. 516–523.
20. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Emelyanenko A.M. Laser tailoring the surface chemistry and morphology for wear, scale and corrosion resistant superhydrophobic coatings // *Langmuir*. 2018. Vol. 34 (24). P. 7059–7066.
21. Sheen Y.C., Huang Y.C., Liao C.S. et al. New approach to fabricate an extremely superamphiphobic surface based on fluorinated silica nanoparticles // *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*. 2008. Vol. 46 (18). P. 1984–1990.
22. Xu Q.F., Wang J.N., Sanderson K.D. Organic-inorganic composite nanocoatings with superhydrophobicity, good transparency, and thermal stability // *ACS Nano*. 2010. Vol. 4 (4). P. 2201–2209.
23. Gupta N., Kavya M.V., Singh Y.R.G. et al. Superhydrophobicity on transparent fluorinated ethylene propylene films with nano-protrusion morphology by Ar + O<sub>2</sub> plasma etching: Study of the degradation in hydrophobicity after exposure to the environment // *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 114 (16). P. 164307.
24. Gu H.Y., Qi Z.Y., Wu W. et al. Superhydrophobic polyimide films with high thermal endurance via UV photo-oxidation // *Express Polymer Letters*. 2014. Vol. 8 (8). P. 588–595.
25. Nguyen-Tri P., Nguyen T.A., Carriere P., Xuan C.N. Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications // *International Journal of Corrosion*. 2018. Vol. 2018. P. 1–19.
26. Wang F., Arai S., Endo M. Electrochemical preparation and characterization of nickel/ultra-dispersed PTFE composite films from aqueous solution // *Materials Transactions*. 2004. Vol. 45 (4). P. 1311–1316.
27. Darband Gh.B., Aliofkhaezai M., Khorsand S. et al. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 13 (1). P. 1763–1802.
28. Toledano R., Mandler D. Electrochemical codeposition of thin gold nanoparticles/sol-gel nanocomposite films // *Chemistry of Materials*. 2010. Vol. 22 (13). P. 3943–3951.
29. Celia E., Darmanin T., Givenchy E. et al. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces // *Journal Colloid Interface Science*. 2013. Vol. 402. P. 1–18.

30. Duan Z., Zhao Z., Luo D. et al. A facial approach combining photosensitive sol-gel with self-assembly method to fabricate superhydrophobic TiO<sub>2</sub> films with patterned surface structure // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 360. P. 1030–1035.
31. Deng X., Mammen L., Butt H.J., Vollmer D. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating // *Science*. 2012. Vol. 335. P. 67–70.
32. Ahn B.K., Lee D.W., Israelachvili J.N., Waite J.H. Surface-initiated self-healing of polymers in aqueous media // *Nature Materials*. 2014. Vol. 13. P. 867–872.
33. Qin L., Chen N., Zhou X., Pan Q. A superhydrophobic aerogel with robust self-healability // *Journal of Materials Chemistry A*. 2018. Vol. 6. P. 4424–4431.
34. Golovin K., Boban M., Mabry J.M., Tuteja A. Designing self-healing superhydrophobic surfaces with exceptional mechanical durability // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2017. Vol. 9. P. 11212–11223.
35. Huang X., Kong X., Cui Y. et al. Durable superhydrophobic materials enabled by abrasion-triggered roughness regeneration // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 336. P. 633–639.
36. Wang Z., Shen X., Qian T. et al. Facile fabrication of a PDMS@stearic acid-kaolin coating on lignocellulose composites with superhydrophobicity and flame retardancy // *Materials Science*. 2018. Vol. 11. P. 727.
37. Lu Y., Sathasivam S., Song J. et al. Repellent materials. Robust self-cleaning surfaces that function when exposed to either air or oil // *Science*. 2015. Vol. 347 (6226). P. 1132–1135.
38. Ling X.Y., Phang I.Y., Vancso G.J. et al. Stable and transparent superhydrophobic nanoparticle films // *Langmuir*. 2009. Vol. 25 (5). P. 3260–3263.
39. Соловьянчик Л.В., Кондрашов С.В. Перспективность использования углеродных нанотрубок для придания поверхности полимерных материалов функциональных свойств (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9 (103). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.
40. Xu L., Karunakaran R.G., Guo J., Yang S. Transparent superhydrophobic surfaces from one-step centrifugation of hydrophobic nanoparticles // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2012. Vol. 4 (2). P. 1118–1125.
41. Пыхтин А.А., Симонов-Емельянов И.Д. Влияние нано- и ультрадисперсных частиц диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) на ударную вязкость эпоксидных полимеров // *Труды ВИАМ*. 2019. № 6 (78). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.09.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-3-12.
42. Ogihara H., Xie J., Okagaki J., Saji T. Simple method for preparing superhydrophobic paper: spray-deposited hydrophobic silica nanoparticle coatings exhibit high water-repellency and transparency // *Langmuir*. 2012. Vol. 28 (10). P. 4605–4608.
43. Su C., Li J., Geng H. et al. Fabrication of an optically transparent super-hydrophobic surface via embedding nano-silica // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 253 (5). P. 2633–2636.
44. Zhang J., Li B., Wu L., Wang A. Facile preparation of durable and robust superhydrophobic textiles by dip coating in nanocomposite solution of organosilanes // *Chemical Communications*. 2013. Vol. 49. P. 11509–11511.
45. Cook K.T., Tettey K.E., Bunch R.M. et al. One-step index-tunable antireflection coatings from aggregated silica nanoparticles // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2012. Vol. 4 (12). P. 6426–6431.
46. Lee D., Rubner M.F., Cohen R.E. All-nanoparticle thin-film coatings // *Nano Letters*. 2006. Vol. 6 (10). P. 2305–2312.
47. Goswami D., Medda S.K., De G. Superhydrophobic films on glass surface derived from trimethylsilanized silica gel nanoparticles // *ACS applied materials & interfaces*. 2011. Vol. 3 (9). P. 3440–3447.
48. Piscitellia F., Tescioneb F., Mazzolaa L. et al. On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 472. P. 71–81.
49. Naderizadeh S., Athanassiou A. Bayer I.S. Interfacing superhydrophobic silica nanoparticle films with graphene and thermoplastic polyurethane for wear/abrasion resistance // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2018. Vol. 519. P. 285–295.

50. Wang X., Zeng J., Yu X., Zhang Y. Superamphiphobic coatings with polymer-wrapped particles: enhancing water harvesting // *Journal of Materials Chemistry*. 2019. Vol. 7. P. 5426–5433.
51. Wooh S., Huesmann H., Tahir M.N. et al. Synthesis of mesoporous supraparticles on superamphiphobic surfaces // *Advanced material*. 2015. Vol. 27 (45). P. 7338–7343.
52. Zhua Q., Lic B., Li S. et al. Durable superamphiphobic coatings with high static and dynamic repellency towards liquids with low surface tension and high viscosity // *Progress in Organic Coatings*. 2022. Vol. 173. P. 107145.
53. Lu Z., Xu L., He Y., Zhou J. One-step facile route to fabricate functionalized nano-silica and silicone sealant based transparent superhydrophobic coating // *Thin Solid Films*. 2019. Vol. 692. P. 137560.
54. Zhang J., Liu S., Huang Y. et al. Durable fluorinated-SiO<sub>2</sub>/epoxy superhydrophobic coatings on polycarbonate with strong interfacial adhesion enhanced by solvent-induced crystallization // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 150. P. 106002.
55. Wang X., Ding H., Sun S., Zhang H. et al. Preparation of a temperature-sensitive superhydrophobic self-cleaning SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>@PDMS coating with photocatalytic activity // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 408. P. 126853.
56. Verma J., Nigam S., Sinha S., Bhattacharya A. Development of polyurethane based anti-scratch and anti-algal coating formulation with silica-titania core-shell nanoparticles // *Vacuum*. 2018. Vol. 153. P. 24–34.
57. Zhang F., Qian H., Wang L. et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 341. P. 15–23.
58. Shen Y., Cai Z., Tao J. et al. Multi-type nanoparticles in superhydrophobic PU-based coatings towards self-cleaning, self-healing and mechanochemical durability // *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 159. P. 106451.
59. Lia B., Zhang J. Durable and self-healing superamphiphobic coatings repellent even to hot liquids // *Chemical Communications*. 2016. Vol. 52. P. 2744–2747.
60. Li H., Qu M., Sun Z. et al. Facile Fabrication of a hierarchical superhydrophobic coating with aluminate coupling agent modified kaolin // *Journal of Nanomaterials*. 2013. Art. ID 497216. P. 5.
61. Qu M., Liu S., He J. et al. Fabrication of recyclable and durable superhydrophobic materials with wear/corrosion-resistance properties from kaolin and polyvinylchloride // *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 410. P. 299–307.
62. Wu B., Lyu J., Peng C. et al. Inverse infusion processed hierarchical structure towards superhydrophobic coatings with ultrahigh mechanical robustness // *Chemical Engineering Journal*. 2020. Vol. 387. P. 124066.
63. Penna M.O., Silva A.A., Rosário F.F. et al. Organophilic nano-alumina for superhydrophobic epoxy coatings // *Materials Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 255. P. 123543.
64. Yuan Z., Bin J., Wang X. et al. Preparation of a polydimethylsiloxane (PDMS)/CaCO<sub>3</sub> based superhydrophobic coating // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 254. P. 97–103.
65. Atta A.M., Al-Lohedan H.A., Ezza A.O., Al-Hussain S. Characterization of superhydrophobic epoxy coatings embedded by modified calcium carbonate nanoparticles // *Progress in Organic Coatings*. 2016. Vol. 101. P. 577–586.
66. Wang P., Yang Y., Wang H., Wang H. Fabrication of super-robust and nonfluorinated superhydrophobic coating based on diatomaceous earth // *Surface and Coatings Technology*. 2019. Vol. 362. P. 90–96.
67. Lazzara G., Cavallaro G., Panchal A. et al. An assembly of organic-inorganic composites using halloysite clay nanotubes // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2018. Vol. 35. P. 42–50.
68. Yuan P., Tan D., Annabi-Bergaya F. Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects // *Applied Clay Science*. 2015. Vol. 112–113. P. 75–93.
69. Cavallaro G., Lazzara G., Milioto S. et al. Nanohydrogel formation within the halloysite lumen for triggered and sustained release // *ACS applied materials & interfaces*. 2018. Vol. 10 (9). P. 8265–8273.
70. Wang J., Zhang L., Li C. Superhydrophobic and mechanically robust polysiloxane composite coatings containing modified silica nanoparticles and PS-grafted halloysite nanotubes // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2022. Vol. 52. P. 56–65.

71. John B., Rajimol P.R., Rajan T.P.D., Sahoo S.K. Design and fabrication of nano textured superhydrophobic and anti-corrosive silane-grafted ZnO/bio-based polyurethane bilayer coating // *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 451. P. 129036.

#### Reference

1. Zheng Y., Gao X., Jiang L. Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. *Soft Matter Journal*, 2007, vol. 3, pp. 178–182.
2. Xi J., Jiang L. Biomimic superhydrophobic surface with high adhesive forces. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, vol. 47 (17), pp. 6354–6357.
3. Barthlott W., Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta*, 1997, vol. 202, pp. 1–8.
4. Ren T., He J. Substrate-versatile approach to robust antireflective and superhydrophobic coatings with excellent self-cleaning property in varied environments. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, vol. 9 (39), pp. 34367–34376.
5. Ma X., Shen B., Zhang L. et al. Porous superhydrophobic polymer/carbon composites for lightweight and self-cleaning EMI shielding application. *Composites Science and Technology*, 2018, vol. 158, pp. 86–93.
6. Yang Z., Wang L., Sun W., Liu G. Superhydrophobic epoxy coating modified by fluorographene used for anti-corrosion and self-cleaning. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 401, pp. 146–155.
7. Liu Y., Bai Y., Jin J. et al. Facile fabrication of biomimetic superhydrophobic surface with anti-frosting on stainless steel substrate. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 355, pp. 1238–1244.
8. Liu Y., Li X., Jin J. et al. Anti-icing property of bio-inspired micro-structure superhydrophobic surfaces and heat transfer model. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 400, pp. 498–505.
9. Buznik V.M., Kablov E.N., Koshurina A.A. *Scientific and technical problems of the development of the Arctic*. Moscow: Nauka, 2015, pp. 275–285.
10. Buznik V.M., Kablov E.N. Technologies for obtaining and adapting materials for use in the Arctic. *Reports of satellite V Int. conf.-school on Chemical Technology of the XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*. Volgograd: Volgograd State Tech. Univ., 2016, pp. 9–10.
11. Bespalov A.S., Nefedov N.I., Deev I.S., Kurshev E.V., Lonsky S.L., Buznik V.M. Features of hydrophobization of high-porous ceramic materials using fluoroligomers. *Trudy VIAM*, 2019, no. 5 (77), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-41-51.
12. Yin K., Du H., Dong X. et al. A simple way to achieve bioinspired hybrid wettability surface with micro/nanopatterns for efficient fog collection. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, pp. 14620–14626.
13. Sun Z., Liao T., Liu K. et al. Fly-Eye Inspired superhydrophobic anti-fogging inorganic nanostructures. *Small*, 2014, vol. 10, pp. 3001–3006.
14. Ou J., Hu W., Xue M. et al. Superhydrophobic surfaces on light alloy substrates fabricated by a versatile process and their corrosion protection. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2013, vol. 5, pp. 3101–3107.
15. Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of international experience on corrosion and corrosion protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 2 (35), pp. 76–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-76-87.
16. Varchenko E.A., Kurs M.G. Crevice corrosion of aluminum alloys and stainless steel in marine water. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-96-105.
17. Chen X., Gong Y., Suo X. et al. Construction of mechanically durable superhydrophobic surfaces by thermal spray deposition and further surface modification. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 356, pp. 639–644.
18. Tesler A.B., Kim P., Kolle S. et al. Extremely durable biofouling-resistant metallic surfaces based on electrodeposited nanoporous tungstite films on steel. *Nature communications*, 2015, vol. 6, p. 8649.
19. Tan C., Cai P., Xu L. et al. Fabrication of superhydrophobic surface with controlled adhesion by designing heterogeneous chemical composition. *Applied Surface Science*, 2015, vol. 349, pp. 516–523.

20. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Emelyanenko A.M. Laser tailoring the surface chemistry and morphology for wear, scale and corrosion resistant superhydrophobic coatings. *Langmuir*, 2018, vol. 34 (24), pp. 7059–7066.
21. Sheen Y.C., Huang Y.C., Liao C.S. et al. New approach to fabricate an extremely superamphiphobic surface based on fluorinated silica nanoparticles. *Journal of Polymer Science. Part B: Polymer Physics*, 2008, vol. 46 (18), pp. 1984–1990.
22. Xu Q.F., Wang J.N., Sanderson K.D. Organic-inorganic composite nanocoatings with superhydrophobicity, good transparency, and thermal stability. *ACS Nano*, 2010, vol. 4 (4), pp. 2201–2209.
23. Gupta N., Kavva M.V., Singh Y.R.G. et al. Superhydrophobicity on transparent fluorinated ethylene propylene films with nano-protrusion morphology by Ar + O<sub>2</sub> plasma etching: Study of the degradation in hydrophobicity after exposure to the environment. *Journal of Applied Physics*, 2013, vol. 114 (16), p. 164307.
24. Gu H.Y., Qi Z.Y., Wu W. et al. Superhydrophobic polyimide films with high thermal endurance via UV photo-oxidation. *Express Polymer Letters*, 2014, vol. 8 (8), pp. 588–595.
25. Nguyen-Tri P., Nguyen T.A., Carriere P., Xuan C.N. Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications. *International Journal of Corrosion*, 2018, vol. 2018, pp. 1–19.
26. Wang F., Arai S., Endo M. Electrochemical preparation and characterization of nickel/ultra-dispersed PTFE composite films from aqueous solution. *Materials Transactions*, 2004, vol. 45 (4), pp. 1311–1316.
27. Darband Gh.B., Aliofkhaezai M., Khorsand S. et al. Science and engineering of superhydrophobic surfaces: review of corrosion resistance, chemical and mechanical stability. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, vol. 13 (1), pp. 1763–1802.
28. Toledano R., Mandler D. Electrochemical codeposition of thin gold nanoparticles/sol-gel nanocomposite films. *Chemistry of Materials*, 2010, vol. 22 (13), pp. 3943–3951.
29. Celia E., Darmanin T., Givenchy E. et al. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces. *Journal Colloid Interface Science*, 2013, vol. 402, pp. 1–18.
30. Duan Z., Zhao Z., Luo D. et al. A facial approach combining photosensitive sol-gel with self-assembly method to fabricate superhydrophobic TiO<sub>2</sub> films with patterned surface structure. *Applied Surface Science*, 2016, vol. 360, pp. 1030–1035.
31. Deng X., Mammen L., Butt H.J., Vollmer D. Candle soot as a template for a transparent robust superamphiphobic coating. *Science*, 2012, vol. 335, pp. 67–70.
32. Ahn B.K., Lee D.W., Israelachvili J.N., Waite J.H. Surface-initiated self-healing of polymers in aqueous media. *Nature Materials*, 2014, vol. 13, pp. 867–872.
33. Qin L., Chen N., Zhou X., Pan Q. A superhydrophobic aerogel with robust self-healability. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, vol. 6, pp. 4424–4431.
34. Golovin K., Boban M., Mabry J.M., Tuteja A. Designing self-healing superhydrophobic surfaces with exceptional mechanical durability. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2017, vol. 9, pp. 11212–11223.
35. Huang X., Kong X., Cui Y. et al. Durable superhydrophobic materials enabled by abrasion-triggered roughness regeneration. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 336, pp. 633–639.
36. Wang Z., Shen X., Qian T. et al. Facile fabrication of a PDMS@stearic acid-kaolin coating on lignocellulose composites with superhydrophobicity and flame retardancy. *Materials Science*, 2018, vol. 11, p. 727.
37. Lu Y., Sathasivam S., Song J. et al. Repellent materials. Robust self-cleaning surfaces that function when exposed to either air or oil. *Science*, 2015, vol. 347 (6226), pp. 1132–1135.
38. Ling X.Y., Phang I.Y., Vancso G.J. et al. Stable and transparent superhydrophobic nanoparticle films. *Langmuir*, 2009, vol. 25 (5), pp. 3260–3263.
39. Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. The prospects of using carbon nanotubes to impart functional properties to the surface of polymer materials (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 9 (103), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-9-11-21.

40. Xu L., Karunakaran R.G., Guo J., Yang S. Transparent superhydrophobic surfaces from one-step centrifugation of hydrophobic nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, vol. 4 (2), pp. 1118–1125.
41. Pykhtin A.A., Simonov-Emelyanov I.D. Effect of nano and ultradispersed silica particles (SiO<sub>2</sub>) on the impact strength of epoxy polymers. *Trudy VIAM*, 2019, no. 6 (78), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 28, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-6-3-12.
42. Ogihara H., Xie J., Okagaki J., Saji T. Simple method for preparing superhydrophobic paper: spray-deposited hydrophobic silica nanoparticle coatings exhibit high water-repellency and transparency. *Langmuir*, 2012, vol. 28 (10), pp. 4605–4608.
43. Su C., Li J., Geng H. et al. Fabrication of an optically transparent super-hydrophobic surface via embedding nano-silica. *Applied Surface Science*, 2006, vol. 253 (5), pp. 2633–2636.
44. Zhang J., Li B., Wu L., Wang A. Facile preparation of durable and robust superhydrophobic textiles by dip coating in nanocomposite solution of organosilanes. *Chemical Communications*, 2013, vol. 49, pp. 11509–11511.
45. Cook K.T., Tettey K.E., Bunch R.M. et al. One-step index-tunable antireflection coatings from aggregated silica nanoparticles. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012, vol. 4 (12), pp. 6426–6431.
46. Lee D., Rubner M.F., Cohen R.E. All-nanoparticle thin-film coatings. *Nano Letters*, 2006, vol. 6 (10), pp. 2305–2312.
47. Goswami D., Medda S.K., De G. Superhydrophobic films on glass surface derived from trimethylsilanized silica gel nanoparticles. *ACS applied materials & interfaces*, 2011, vol. 3 (9), pp. 3440–3447.
48. Piscitellia F., Tescioneb F., Mazzolaa L. et al. On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications. *Applied Surface Science*, 2019, vol. 472, pp. 71–81.
49. Naderizadeh S., Athanassiou A. Bayer I.S. Interfacing superhydrophobic silica nanoparticle films with graphene and thermoplastic polyurethane for wear/abrasion resistance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, vol. 519, pp. 285–295.
50. Wang X., Zeng J., Yu X., Zhang Y. Superamphiphobic coatings with polymer-wrapped particles: enhancing water harvesting. *Journal of Materials Chemistry*, 2019, vol. 7, pp. 5426–5433.
51. Wooh S., Huesmann H., Tahir M.N. et al. Synthesis of mesoporous supraparticles on superamphiphobic surfaces. *Advances material*, 2015, vol. 27 (45), pp. 7338–7343.
52. Zhua Q., Lic B., Li S. et al. Durable superamphiphobic coatings with high static and dynamic repellency towards liquids with low surface tension and high viscosity. *Progress in Organic Coatings*, 2022, vol. 173, p. 107145.
53. Lu Z., Xu L., He Y., Zhou J. One-step facile route to fabricate functionalized nano-silica and silicone sealant based transparent superhydrophobic coating. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 692, p. 137560.
54. Zhang J., Liu S., Huang Y. et al. Durable fluorinated-SiO<sub>2</sub>/epoxy superhydrophobic coatings on polycarbonate with strong interfacial adhesion enhanced by solvent-induced crystallization. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 150, p. 106002.
55. Wang X., Ding H., Sun S., Zhang H. et al. Preparation of a temperature-sensitive superhydrophobic self-cleaning SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>@PDMS coating with photocatalytic activity. *Surface and Coatings Technology*, 2021, vol. 408, p. 126853.
56. Verma J., Nigam S., Sinha S., Bhattacharya A. Development of polyurethane based anti-scratch and anti-algal coating formulation with silica-titania core-shell nanoparticles. *Vacuum*, 2018, vol. 153, pp. 24–34.
57. Zhang F., Qian H., Wang L. et al. Superhydrophobic carbon nanotubes/epoxy nanocomposite coating by facile one-step spraying. *Surface and Coatings Technology*, 2018, vol. 341, pp. 15–23.
58. Shen Y., Cai Z., Tao J. et al. Multi-type nanoparticles in superhydrophobic PU-based coatings towards self-cleaning, self-healing and mechanochemical durability. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 159, p. 106451.

59. Lia B., Zhang J. Durable and self-healing superamphiphobic coatings repellent even to hot liquids. *Chemical Communications*, 2016, vol. 52, pp. 2744–2747.
60. Li H., Qu M., Sun Z. et al. Facile Fabrication of a hierarchical superhydrophobic coating with aluminate coupling agent modified kaolin. *Journal of Nanomaterials*, 2013, art. ID 497216, p. 5.
61. Qu M., Liu S., He J. et al. Fabrication of recyclable and durable superhydrophobic materials with wear/corrosion-resistance properties from kaolin and polyvinylchloride. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 410, pp. 299–307.
62. Wu B., Lyu J., Peng C. et al. Inverse infusion processed hierarchical structure towards superhydrophobic coatings with ultrahigh mechanical robustness. *Chemical Engineering Journal*, 2020, vol. 387, p. 124066.
63. Penna M.O., Silva A.A., Rosário F.F. et al. Organophilic nano-alumina for superhydrophobic epoxy coatings. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 255, p. 123543.
64. Yuan Z., Bin J., Wang X. et al. Preparation of a polydimethylsiloxane (PDMS)/CaCO<sub>3</sub> based superhydrophobic coating. *Surface and Coatings Technology*, 2014, vol. 254, pp. 97–103.
65. Atta A.M., Al-Lohedan H.A., Ezza A.O., Al-Hussain S. Characterization of superhydrophobic epoxy coatings embedded by modified calcium carbonate nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 2016, vol. 101, pp. 577–586.
66. Wang P., Yang Y., Wang H., Wang H. Fabrication of super-robust and nonfluorinated superhydrophobic coating based on diatomaceous earth. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 362, pp. 90–96.
67. Lazzara G., Cavallaro G., Panchal A. et al. An assembly of organic-inorganic composites using halloysite clay nanotubes. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2018, vol. 35, pp. 42–50.
68. Yuan P., Tan D., Annabi-Bergaya F. Properties and applications of halloysite nanotubes: recent research advances and future prospects. *Applied Clay Science*, 2015, vol. 112–113, pp. 75–93.
69. Cavallaro G., Lazzara G., Milioto S. et al. Nanohydrogel formation within the halloysite lumen for triggered and sustained release. *ACS applied materials & interfaces*, 2018, vol. 10 (9), pp. 8265–8273.
70. Wang J., Zhang L., Li C. Superhydrophobic and mechanically robust polysiloxane composite coatings containing modified silica nanoparticles and PS-grafted halloysite nanotubes. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, vol. 52, pp. 56–65.
71. John B., Rajimol P.R., Rajan T.P.D., Sahoo S.K. Design and fabrication of nano textured superhydrophobic and anti-corrosive silane-grafted ZnO/bio-based polyurethane bilayer coating. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 451, p. 129036.

**Информация об авторах**

**Марченко Сергей Андреевич**, инженер I категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Железняк Вячеслав Геннадьевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Кузнецова Вера Аркадьевна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Information about the authors**

**Sergey A. Marchenko**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vyacheslav G. Zheleznyak**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Vera A. Kuznetsova**, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2022; получена после доработки 20.02.2023; одобрена и принята к публикации после рецензирования 20.02.2023.

The article was submitted 26.12.2022; received in revised form 20.02.2023; approved and accepted for publication after reviewing 20.02.2023.