

Научная статья

УДК 539.612

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-76-83

## ЗАВИСИМОСТЬ АДГЕЗИИ ЛЬДА ОТ ГИДРОФОБНЫХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ СПОСОБОМ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО РАСПЫЛЕНИЯ

С.А. Марченко<sup>1</sup>, В.Г. Железняк<sup>1</sup>, В.А. Кузнецова<sup>1</sup>, Е.А. Тимошина<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.** Определены зависимости противообледенительных свойств полимерных покрытий от гидрофобных характеристик. Покрытия, нанесенные способом пневматического распыления, не имели четко выстроенной структуры шероховатости. Для исследования выбраны полимерные покрытия различной химической природы на основе: кремнийорганического сополимера, сополимера винилиденфторида и хлортрифторэтилена, фторполиуретана, эпоксидного лака, акрилового сополимера, полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука. Получены зависимости адгезии льда от краевого угла смачивания, шероховатости и времени замерзания воды.

**Ключевые слова:** гидрофобные полимерные покрытия, адгезия льда, краевой угол смачивания, время замерзания воды, противообледенительные покрытия, пневматическое распыление

**Для цитирования:** Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А., Тимошина Е.А. Зависимость адгезии льда от гидрофобных свойств полимерных покрытий, нанесенных способом пневматического распыления // Труды ВИАМ. 2024. № 2 (132). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-76-83.

Scientific article

## DEPENDENCE OF ICE ADHESION ON THE HYDROPHOBIC PROPERTIES OF POLYMER COATINGS, APPLIED OF PNEUMATIC SPRAYING METHOD

S.A. Marchenko<sup>1</sup>, V.G. Zheleznyak<sup>1</sup>, V.A. Kuznetsova<sup>1</sup>, E.A. Timoshina<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.** The work focused on determining the dependence of the anti-icing properties of coatings on hydrophobic properties. The coatings were applied by pneumatic spraying and did not have a clearly structured roughness structure. For the study, polymer coatings of various chemical natures were selected based on: organosilicon copolymer, copolymer of vinylidene fluoride and chlorotrifluoroethylene, fluoropolyurethane, epoxy varnish, acrylic copolymer, poly-dieneurethane with epoxy end groups and fluorosiloxane rubber. The dependences of ice adhesion on the contact angle of wetting, roughness and freezing time of water were determined.

**Keywords:** hydrophobic polymer coatings, ice adhesion, contact angle, water freezing time, anti-icing coatings, pneumatic spraying

**For citation:** Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A., Timoshina E.A. Dependence of ice adhesion on the hydrophobic properties of polymer coatings, applied of pneumatic spraying method. *Trudy VIAM*, 2024, no. 2 (132), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-2-76-83.

## Введение

Разработка прочной гидрофобной противообледенительной поверхности всегда вызывала большой интерес, так как обледенение оказывает пагубное воздействие на различные виды жилой и промышленной деятельности, включая транспортные системы, энергетическое оборудование, телекоммуникационные установки, авиационный транспорт и т. д. [1–4]. Например, современные самолеты оснащены системой защиты от обледенения с использованием методов нагрева, которые увеличивают массу и расход топлива, усложняют систему электропитания [5]. Таким образом, прочное противообледенительное покрытие на передней кромке крыльев является идеальным решением для уменьшения налипания льда на поверхности самолета и повышения энергоэффективности в процессе борьбы с обледенением [6–8].

Гидрофобная поверхность представляет собой водоотталкивающую поверхность с углом контакта с водой  $>90$  градусов (для супергидрофобных  $>150$  градусов). Это позволяет каплям воды скатываться с поверхности, задерживая образование и снижая прочность сцепления льда [9–11].

Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований подтверждают, что супергидрофобные покрытия способны противостоять обледенению при следующих условиях:

- угол скатывания  $<10$  градусов, краевого угла смачивания (КУС)  $>150$  градусов. Капли воды, взаимодействующие с поверхностью покрытия, должны легко отскакивать, скатываться или удаляться с поверхности перед обледенением [12–14];

- предотвращение или задержка образования льда за счет снижения интенсивности теплообмена между сталкивающимися переохлажденными каплями и подложкой, что замедляет кристаллизацию льда [15, 16];

- прочность сцепления льда с поверхностью  $<100$  кПа, что позволяет минимизировать энергию/силу, необходимую для устранения обледенения (высказано предположение, что для покрытия в пассивной системе требуется сила сцепления льда  $<20$  кПа [17]);

- определенная геометрическая морфология шероховатой структуры, которая влияет на фазовые превращения при образовании зародышей и кристаллизации льда [18]. Экспериментальные результаты показали, что шероховатая поверхность с микро- или наноструктурой по противообледенительным характеристикам имеет преимущества перед поверхностью с индивидуальной нано- или микроструктурой и намного эффективнее по сравнению с гладкой поверхностью [19];

- поверхностная механическая прочность чрезвычайно ограничивает возможности использования покрытий в реальных условиях [20]. Механическая прочность структуры шероховатости на покрытиях имеет решающее значение для противообледенительного эффекта.

Противообледенительные свойства покрытий также зависят от химической природы полимеров. При разработке противообледенительных покрытий наиболее часто используют фторполимеры (например, на основе политетрафторэтилена или поливинилиденфторида), а также вязкоупругие силиконы [21–23]. Низкая поверхностная энергия связи функциональной группы (метил, фенил или трифторпропил) с силоксановой цепью в сочетании с низким модулем упругости обеспечивает противообледенительные свойства [17].

В данной работе исследована зависимость адгезии льда от гидрофобных свойств (краевого угла смачивания, шероховатости, времени замерзания воды) покрытий различной химической природы, имеющих хаотичную шероховатость поверхности и не обладающих супергидрофобными свойствами. Исследования относятся к полимерным покрытиям, нанесенным с помощью пневматического распыления.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации стратегического направления 17. «Комплексная антикоррозионная защита, упрочняющие, износостойкие защитные и теплозащитные покрытия» комплексной научной проблемы 17.7.

«Лакокрасочные материалы и покрытия на полимерной основе» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Материалы и методы

Для определения зависимости адгезии льда от КУС, шероховатости и времени замерзания воды исследованы полимерные покрытия на основе: кремнийорганического сополимера, сополимера винилиденфторида и хлортрифторэтилена, фторполиуретана, эпоксидного лака, акрилового сополимера, полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука. С точки зрения поверхностных свойств, наиболее эффективны фторопластовые составы, виниловые составы на основе сополимера винилхлорида, кремнийорганические составы, а также составы, модифицированные фтором и/или кремнийорганическими компонентами.

Подложка – образцы алюминиевого сплава Д16 с нанесенным покрытием Ан.Окс.нхр. Давление сжатого воздуха при нанесении покрытий составляло 0,6 МПа. После отверждения образцы с покрытиями выдерживали в течение 5 сут при температуре  $20 \pm 2$  °С.

Значения адгезии льда к покрытиям определяли путем измерения силы, необходимой для разрушения связи между поверхностью полимерного покрытия и примороженного с помощью ленты из батистовой ткани льда, с использованием разрывной машины с термокамерой. Усилие при испытании действует вдоль поверхности соединения. Температура внутри камеры во время испытаний составляла  $-10$  °С, скорость отрыва ленты от образца 5 мм/мин, площадь сечения примораживаемой к образцу ленты  $20 \times 20$  мм. Перед началом испытаний образцы выдерживали в камере холода в течение 24 ч. Метод используется для сравнительной оценки адгезии льда к поверхности полимерных покрытий и не коррелируется с другими методами [24, 25].

Для получения более точных результатов при подготовке к испытаниям по определению адгезии льда учитывали следующие факторы:

- толщины испытываемых поверхностей должны находиться в одном диапазоне;
- замораживание и испытания следует проводить в морозильной камере, при одинаковой температуре, не перенося образцы к установке во избежание таяния льда или сократив время этого действия до минимальных значений;
- необходимо использовать дистиллированную воду, так как применение водопроводной воды приводит к образованию хрупкого льда и получению некорректных данных;
- следует избегать быстрого замораживания льда [26].

Шероховатость поверхности образцов с полимерными покрытиями определяли с помощью профилометра TR200 в соответствии с ГОСТ 2789–73, толщину покрытий – с помощью прибора «Константа К6Ц» в соответствии с ГОСТ 31993–2013.

Измерения КУС проводили на универсальном оптическом приборе при температурах столика  $+20$  и  $-20$  °С методом лежащей капли в воздушной среде в соответствии с ISO 19403–6. Среднее значение КУС определяли по трем каплям. В качестве смачивающей жидкости применяли дистиллированную воду.

Время замерзания капли измеряли с помощью тепловизора. Время полного замерзания определяли как время с момента помещения капли на охлажденный столик до замерзания верхней точки капли. Перед испытанием образец охлаждали на столике в течение 5 мин. Температура столика составила  $-20$  °С, объем капли 8 мкл.

### Результаты и обсуждение

Определена толщина полимерных покрытий для исключения влияния данного параметра на результаты испытаний. Средние значения толщины для всех покрытий находятся в пределах 60–80 мкм.

Результаты исследования свойств полимерных покрытий представлены в таблице.

Свойства полимерных покрытий

Полимерное покрытие	Адгезия льда, кПа	КУС, градус	Шероховатость $R_a$ , мкм	Время заморозки капли, с	КУС замерзшей капли, градус	Изменение КУС при охлаждении, градус
Кремнийорганический сополимер	19,1	85,3	0,069	23,54	61,2	24,1
Сополимер винилиденфторида и хлортрифторэтилена	147,1	91,0	4,407	15,40	58,3	32,7
Фторполиуретан	48,5	88,2	0,321	19,35	48,5	39,7
Эпоксидный лак	45,3	85,1	0,073	22,01	32,9	52,4
Акриловый сополимер	83,2	79,0	1,274	19,56	53,4	25,6
Полидиенуретан с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксановый каучук	42,5	108,4	0,179	29,60	62,8	45,6

Примечание. КУС – краевой угол смачивания. Приведены средние значения по трем измерениям.

Наименьшее значение адгезии льда (19,1 кПа) имело покрытие на основе кремнийорганического сополимера. Низкие значения данного показателя также имеют покрытия на основе эпоксидного лака, смеси полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука, фторполиуретана. Наибольшая величина адгезии льда отмечена для покрытия на основе раствора синтетического фторсодержащего сополимера.

Четыре из шести исследуемых покрытий имеют КУС <90 градусов, т. е. не обладают гидрофобными свойствами. Наименьшее значение КУС имеет покрытие на основе акрилового сополимера (рис. 1, а), наибольшее – на основе смеси полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука (рис. 1, б).

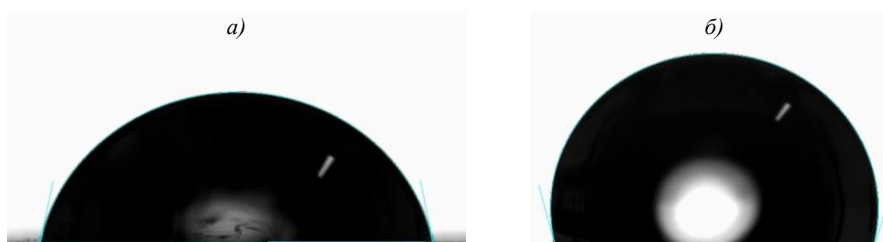


Рис. 1. Капли воды на поверхности покрытий на основе акрилового сополимера (а) и на основе полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука (б)

На рис. 2, а показана зависимость адгезии льда полимерных покрытий от КУС.

Величина угла смачивания отражает степень межмолекулярного взаимодействия частиц жидкости и поверхности твердого тела. Однако результаты испытаний показывают, что зависимость адгезии льда от КУС для покрытий со слабыми гидрофобными свойствами практически не прослеживается. Влияние этого показателя наиболее явно прослеживается для покрытий с наибольшим уровнем КУС (>100 градусов).

Исследована способность покрытий к стеканию капель воды. При наклоне столика на угол 15 градусов капля не стекала с поверхности всех исследуемых покрытий из-за недостаточного уровня их гидрофобных свойств.

Шероховатость покрытия в значительной степени влияет на адгезию льда. Даже для эпоксидного лака, который не обладает высоким уровнем гидрофобных свойств за счет низкой шероховатости, значение адгезии льда составляет 45,3 кПа. Наиболее высокое значение адгезии льда (147,1 кПа) при шероховатости 4,407 мкм отмечено для сополимера винилиденфторида и хлортрифторэтилена, который обладает высокой природной гидрофобностью. Следует упомянуть, что существенное влияние на адгезию льда оказывает морфология шероховатости. Покрытия с равными значениями шероховатости  $R_a$  могут значительно отличаться по адгезионной прочности льда за счет более упорядоченной структуры поверхности.

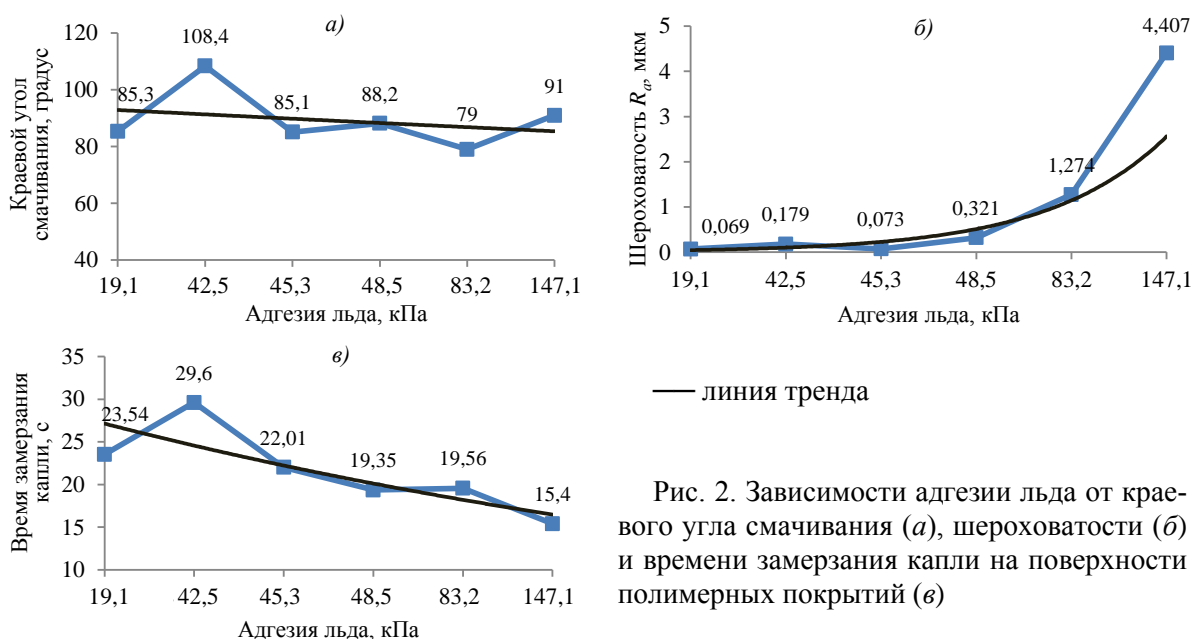


Рис. 2. Зависимости адгезии льда от краевого угла смачивания (а), шероховатости (б) и времени замерзания капли на поверхности полимерных покрытий (в)

Для негидрофобных покрытий зависимость адгезии льда от шероховатости прослеживается более четко (рис. 2, б), чем зависимость от КУС. Из данных таблицы следует, что КУС для покрытий, не обладающих гидрофобностью (определенной морфологией шероховатости), не зависит от шероховатости.

Для большинства покрытий с наименьшей адгезией льда время замерзания капли на поверхности превышает 20 с, наибольшее значение данного показателя зафиксировано для покрытия на основе полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука.

На рис. 2, в можно проследить зависимость адгезии льда от времени замерзания капли для покрытий со слабыми гидрофобными свойствами.

При воздействии отрицательной температуры капля воды при замерзании принимает форму с заостренной вершиной, что объясняется вертикальным расширением льда в сочетании с напряжением поверхности на оставшейся жидкости (рис. 3).



Рис. 3. Капли воды на поверхности покрытий на основе эпоксидного лака (а) и на основе полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука (б) после замерзания

Наибольшие значения КУС замерзшей капли имели покрытия на основе полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука, а также кремнийорганического сополимера. Адгезия льда для покрытий, не обладающих гидрофобными свойствами, не зависит от КУС замерзшей капли, а также от изменения КУС при охлаждении капли.

### Заключения

Исследованы зависимости противообледенительных свойств от гидрофобности полимерных покрытий различной химической природы на основе: кремнийорганического сополимера, сополимера винилиденфторида и хлортрифторэтилена, фторполиуретана, эпоксидного лака, акрилового сополимера, полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука. Покрытия наносили способом пневматического распыления, они не имели четко выстроенной структуры шероховатости. Определены зависимости адгезии льда от КУС, шероховатости и времени замерзания воды.

Наименьшее значение адгезии льда зафиксировано для покрытия на основе кремнийорганического сополимера (19,1 кПа). Наибольшее значение КУС имело покрытие на основе смеси полидиенуретана с эпоксидными концевыми группами и фторсилоксанового каучука. Для покрытий со слабыми гидрофобными свойствами зависимость адгезии льда от КУС практически не прослеживается.

На адгезию льда в значительной степени влияет шероховатость покрытия. Так, эпоксидный лак, который не обладает высокими гидрофобными свойствами за счет низкой шероховатости, имеет одно из самых низких значений адгезии льда (45,3 кПа).

Для негидрофобных покрытий зависимости адгезии льда от шероховатости и времени замерзания капли прослеживаются более четко, чем зависимость от КУС. Таким образом, противообледенительные свойства покрытий, не обладающих гидрофобностью, в большей степени зависят от шероховатости и времени замерзания капли, чем от КУС.

### Список источников

1. Frohboese P., Anders A. Effects of icing on wind turbine fatigue loads // *Journal of Physics: Conference Series*. 2007. Vol. 75. P. 012061.
2. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: critical review // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 65. P. 88–96.
3. Каблов Е.Н. *Авиационное материаловедение: итоги и перспективы* // *Вестник Российской академии наук*. 2002. Т. 72. № 1. С. 3–12.
4. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // *Вопросы материаловедения*. 2006. № 1. С. 64–67.
5. Gent R., Dart N., Cansdale J. Aircraft icing // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2000. Vol. 358 (1776). P. 2873–2911.
6. Бузник В.М., Каблов Е.Н., Кошурина А.А. *Материалы для сложных технических устройств арктического применения* // *Научно-технические проблемы освоения Арктики*. М.: Наука, 2015. С. 275–285.
7. Каблов Е.Н. *Материалы нового поколения* // *Защита и безопасность*. 2014. № 4. С. 28–29.
8. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
9. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nano-uorocarbon coating on icing // *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 258:18. P. 7219–7224.
10. Shen Y., Tao J., Tao H. et al. Anti-icing potential of superhydrophobic  $Ti_6Al_4V$  surfaces: ice nucleation and growth // *Langmuir*. 2015. Vol. 31. P. 10799–10806.
11. Liu J., Janjua Z.A., Roe M. et al. Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified with self-assembled monolayers // *Nanomaterials*. 2016. Vol. 6. P. 232.
12. Tourkine P., Le Merrer M., Quere D. Delayed freezing of water-repellent material // *Langmuir*. 2009. Vol. 25. P. 7214–7216.
13. Varanasi K., Deng T., Smith J.D. et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 97. Art. 234102.
14. Каблов Е.Н., Соловьянич Л.В., Кондрашов С.В. и др. Электропроводящие гидрофобные полимерные композиционные материалы на основе окисленных углеродных нанотрубок, модифицированных теломерами тетрафторэтилена // *Российские нанотехнологии*. 2016. Т. 11. № 11–12. С. 91–97.

15. Antonini C., Innocenti C., Horn T. et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems // *Cold Regions Science and Technology*. 2011. Vol. 67. P. 58–67.
16. Li J., Zhou Y., Wang W. et al. Superhydrophobic copper surface textured by laser for delayed icing phenomenon // *Langmuir*. 2020. Vol. 36 (5). P. 1075–1082.
17. Golovin K., Kobaku S., Lee D. et al. Designing durable icephobic surfaces // *Science advances*. 2016. Vol. 2. P. 1–12.
18. Diao Y., Harada T., Myerson A. et al. The role of nanopore shape in surface-induced crystallization // *Nature Materials*. 2011. Vol. 10. P. 867–871.
19. Guo P., Zheng Y., Wen M. et al. Icephobic/Anti-Icing properties of Micro/Nanostructured surfaces // *Advanced Materials*. 2012. Vol. 24. P. 2642–2648.
20. Tian X., Verho T., Ras R. Surface wear. Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications // *Science*. 2016. Vol. 352. P. 142.
21. Yang S., Xia Q., Zhu L. et al. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials // *Applied Surface Science*. 2011. Vol. 257. P. 4956–4962.
22. Peng C., Xing S., Yuan Z., Jiayu X. Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade // *Applied Surface Science*. 2012. Vol. 259. P. 764–768.
23. Тарасова П.Н., Слепцова С.А., Лаукканен С., Дьяконов А.А. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 30.10.2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
24. Bragg M., Broeren A., Blumenthal L. Iced-airfoil aerodynamics // *Progress in Aerospace sciences*. 2005. Vol. 41 (5). P. 323–362.
25. Кондрашов С.В., Пыхтин А.А., Соловьянчик Л.В., Большаков В.А., Павлюк Б.Ф., Бадамшина Э.Р., Джалмуханова А.С., Карпов С.В. Исследование зависимости адгезии льда к полиуретановым покрытиям от их физико-механических свойств // *Труды ВИАМ*. 2019. № 3 (75). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-87-95.
26. Марченко С.А., Железняк В.Г., Кузнецова В.А. Адгезия льда. Методы определения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 9 (115). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.12.2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-143-160.

### References

1. Frohboese P., Anders A. Effects of icing on wind turbine fatigue loads. *Journal of Physics: Conference Series*, 2007, vol. 75, p. 012061.
2. Parent O., Ilinca A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: critical review. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 65, pp. 88–96.
3. Kablov E.N. Aviation materials science: results and prospects. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2002, vol. 72, no. 1, pp. 3–12.
4. Kablov E.N. Structural and functional materials are the basis of economic, scientific and technical development of Russia. *Voprosy materialovedeniya*, 2006, no. 1, pp. 64–67.
5. Gent R., Dart N., Cansdale J. Aircraft icing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2000, vol. 358 (1776), pp. 2873–2911.
6. Buznik V.M., Kablov E.N., Koshurina A.A. Materials for complex technical devices for Arctic applications. *Scientific and technical problems of Arctic development*. Moscow: Nauka, 2015, pp. 275–285.
7. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4, pp. 28–29.
8. Abramova M.G., Lutsenko A.N., Varchenko E.A. Concerning the aspects of validation of climate resistance of airborne materials at all life cycle stages (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.
9. Wang H., He G., Tian Q. Effects of nano-uorocarbon coating on icing. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 258:18, pp. 7219–7224.
10. Shen Y., Tao J., Tao H. et al. Anti-icing potential of superhydrophobic Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V surfaces: ice nucleation and growth. *Langmuir*, 2015, vol. 31, pp. 10799–10806.
11. Liu J., Janjua Z.A., Roe M. et al. Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified with self-assembled monolayers. *Nanomaterials*, 2016, vol. 6, p. 232.
12. Tourkine P., Le Merrer M., Quere D. Delayed freezing of water-repellent material. *Langmuir*, 2009, vol. 25, pp. 7214–7216.

13. Varanasi K., Deng T., Smith J.D. et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces. *Applied Physics Letters*, 2010, vol. 97, art. 234102.
14. Kablov E.N., Solovyanchik L.V., Kondrashov S.V. et al. Electrically conductive hydrophobic polymer composite materials based on oxidized carbon nanotubes modified with tetrafluoroethylene telomers. *Rossiyskie nanotekhnologii*, 2016, vol. 11, no. 11–12, pp. 91–97.
15. Antonini C., Innocenti C., Horn T. et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, vol. 67, pp. 58–67.
16. Li J., Zhou Y., Wang W. et al. Superhydrophobic copper surface textured by laser for delayed icing phenomenon. *Langmuir*, 2020, vol. 36 (5), pp. 1075–1082.
17. Golovin K., Kobaku S., Lee D. et al. Designing durable icephobic surfaces. *Science advances*, 2016, vol. 2, pp. 1–12.
18. Diao Y., Harada T., Myerson A. et al. The role of nanopore shape in surface-induced crystallization. *Nature Materials*, 2011, vol. 10, pp. 867–871.
19. Guo P., Zheng Y., Wen M. et al. Icephobic/Anti-Icing properties of Micro/Nanostructured surfaces. *Advanced Materials*, 2012, vol. 24, pp. 2642–2648.
20. Tian X., Verho T., Ras R. Surface wear. Moving superhydrophobic surfaces toward real-world applications. *Science*, 2016, vol. 352, p. 142.
21. Yang S., Xia Q., Zhu L. et al. Research on the icephobic properties of fluoropolymer-based materials. *Applied Surface Science*, 2011, vol. 257, pp. 4956–4962.
22. Peng C., Xing S., Yuan Z., Jiayu X. Preparation and anti-icing of superhydrophobic PVDF coating on a wind turbine blade. *Applied Surface Science*, 2012, vol. 259, pp. 764–768.
23. Tarasova P.N., Sleptsova S.A., Laukkanen S., Dyakonov A.A. Sealing materials based on polytetrafluoroethylene for aviation products. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 30, 2023). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64.
24. Bragg M., Broeren A., Blumenthal L. Iced-airfoil aerodynamics. *Progress in Aerospace sciences*, 2005, vol. 41 (5), pp. 323–362.
25. Kondrashov S.V., Pykhtin A.A., Solovyanchik L.V., Bolshakov V.A., Pavlyuk B.Ph., Badamshina E.R., Dzhalumukhanova A.S., Karpov S.V. Research of dependence of adhesion of ice to polyurethane coatings from their physicomechanical properties. *Trudy VIAM*, 2019, no. 3 (75), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-3-87-95.
26. Marchenko S.A., Zheleznyak V.G., Kuznetsova V.A. Ice adhesion. Methods of determination (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 9 (115), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 17, 2023). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-9-143-160.

*Информация об авторах*

**Марченко Сергей Андреевич**, инженер 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Железняк Вячеслав Геннадьевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Кузнецова Вера Аркадьевна**, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Тимошина Екатерина Александровна**, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

*Information about the authors*

**Sergey A. Marchenko**, First Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

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

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

**Ekaterina A. Timoshina**, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 29.01.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 30.01.2024.  
The article was submitted 29.01.2024; approved and accepted for publication after reviewing 30.01.2024.