

С. В. Какаулин^{1}, И. К. Кабардин¹, М. Р. Гордиенко¹, К. С. Зубанов¹*

Уменьшение адгезии льда путем применения пластиковых полимерных наноструктурированных покрытий при защите от обледенения лопастей ветрогенераторов

¹ Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: kakaulin_serger@mail.ru

Аннотация. Наиболее сложной проблемой внедрения ветрогенераторов в России является проблема их обледенения. В решении данной проблемы могут помочь гидрофобные поверхности, в частности, пластиковые полимерные наноструктурированные покрытия. Цель исследования заключалась в проверке ряда полимерных покрытий на стойкость ко льду типа изморозь посредством измерения адгезии. С помощью метода центробежного воздействия удалось получить зависимости в силе сцепления между исследованными образцами. Моделирование обледенения происходило на климатическом стенде. Такой подход к проведению испытаний увеличивает достоверность получаемых данных и помогает более эффективно оценить эффективность гидрофобных покрытий в условиях, максимально приближенных к реальным.

Ключевые слова: полимерные наноструктурированные покрытия, ветрогенератор, адгезия, центробежное воздействие

S. V. Kakaulin^{1}, I. K. Kabardin¹, M. R. Gordienko¹, K. S. Zubanov¹*

Reducing Ice Adhesion by Using Plastic Polymer Nanostructured Coatings to Protect Wind Turbine Blades from Icing

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: kakaulin_serger@mail.ru

Abstract. The most difficult problem with the introduction of wind turbines in Russia is the problem of their icing. Hydrophobic surfaces, in particular plastic polymer nanostructured coatings, can help solve this problem. The purpose of the study was to test a number of polymer coatings for frost resistance to ice by measuring adhesion. Using the method of centrifugal action, it was possible to obtain dependences in the strength of adhesion between the studied samples. The icing simulation took place on a climate stand. This approach to testing increases the reliability of the data obtained and helps to more effectively assess the effectiveness of hydrophobic coatings in conditions as close as possible to real ones.

Keywords: polymer nanostructured coatings, wind generator, adhesion, centrifugal action

Введение

Внедрение ветрогенераторов в некоторых регионах России сталкивается с рядом проблем. Недостаток инфраструктуры, несовершенные климатические условия, конкуренция с другими источниками энергии, регулирование и правовые аспекты, а также социальные и экологические вопросы могут оказывать вли-

яние на успешность проектов [1]. Несмотря на это, внедрение ветрогенераторов остается перспективным при правильном планировании и учете всех факторов. Решение этих проблем поможет сделать ветроэнергетику более доступной и конкурентоспособной в России, что, в свою очередь, способствует диверсификации энергетического сектора.

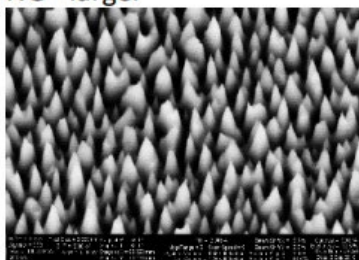
Решение проблем с обледенением ветрогенераторов является ключевым условием при внедрении данной технологии для повсеместного применения. Цель, поставленная в работе, заключается в проверке пластиковых полимерных наноструктурированных покрытий на стойкость ко льду типа изморозь, посредством измерения адгезии.

Одним из основных критериев оценки противообледенительных свойств разрабатываемых материалов является адгезия льда. В современных исследованиях все больше внимания уделяется противообледенительным покрытиям, поверхности которых обладают низкой смачиваемостью [2]. Это способствует удалению капель, предотвращает замерзание и уменьшает сцепление льда с подложкой. Однако, стоит отметить, что полимерные пластиковые нанопокрывтия в контексте их противообледенительного применения до сих пор не были достаточно систематически изучены. Проблема заключается в отсутствии единого стандарта для определения сцепления материала со льдом. В результате существует множество методов оценки адгезии льда, и сложно точно определить прочность сцепления материала со льдом. Тем не менее, общее мнение сводится к тому, что более низкие значения силы указывают на более высокие противообледенительные свойства материала.

В качестве покрытий лопаток исследованы нанесенные литографическим способом на поверхности экспериментальных образцов иерархические наноструктуры [3]. Такие поверхности обладают свойствами супергидрофобности, характеризуются низкими коэффициентами теплопроводности и трения, а также обладают хорошей проводимостью и низкой адгезией к образуемому льду. Супергидрофобность достигается за счет сохраняемого в наноструктурах воздуха, что позволяет существенно уменьшить теплопроводность и эффективную площадь контакта капли с поверхностью. Наличие воздушной подушки усиливает скольжение и способствует удалению капель с поверхности, благодаря большому углу смачивания.

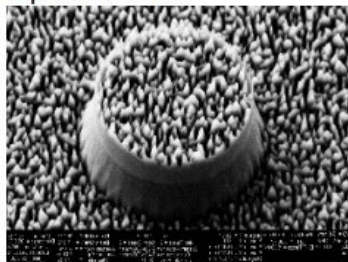
Во многих исследованиях в качестве природных прототипов нанопервохностей используются листья лотоса, обладающие сильными водоотталкивающими свойствами. Структура таких первохностей имеет сложный иерархический вид, включающий нанотраву мельчайшего размера, пальцевидные наросты – микро-столбики и глубокие впадины – микробороздки (рис. 1).

nasok 102
NG - larger



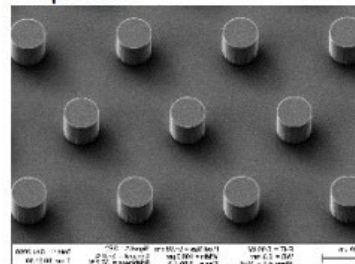
Наросты в виде нанотравы, 60 нм

nasok 094
5 μm MP + NG



Наросты в виде столбиков высотой 5 мкм с покрытием нанотравой 60 нм

nasok OBL 002
10 μm MP



Наросты в виде столбиков высотой 10 мкм

Рис. 1. Структура исследованных покрытий

Экспериментальная установка, материалы и методики экспериментов

В рабочем участке установки с помощью водораспылительной системы создается водокапельный поток холодного воздуха, контролируемый средствами измерений технологических параметров установки, физических характеристик параметров потока и исследуемых моделей. Более подробное описание климатических труб, использованных в работе, представлено в работе [4].

Были проведены подготовительные работы для выполнения экспериментов по оценке адгезии льда на климатической трубе. Была собрана экспериментальная установка, которая включает в себя следующие элементы. Для вращения экспериментальных деталей и выполнения оценки адгезии была выбрана угловая шлифовальная машинка (УШМ), редуктор и двигатель которой позволяют легко привести в движение диск (рис. 2). Подложки для обледенения изготовлены на 3D-принтере из PLA пластика. Для выполнения эксперимента была изготовлена рамка для пленок, чтобы надежно закрепить пленку на подложке. Как и подложка, рамка была изготовлена на 3D-принтере. Размер «окна» открытой части, предназначенной для непосредственного контакта набегающего потока и гидрофобных покрытий, 20x10 мм.

В пленках проделывались отверстия, совпадающие с отверстиями в подложке. Все действия выполняются осторожно, сохраняя целостность поверхности пленки. С торцов рамка соединялась с подложкой двумя болтами, надежно фиксируя гидрофобную пленку между деталями. Детали крепились к диску диаметром 400 мм. Лабораторный автотрансформатор использовался для регулировки скорости вращения диска. Исследуемые образцы помещались в климатическую трубу для обледенения при различных параметрах эксперимента. После того, как подложка обледенела (рис. 3) в течение заданного времени, она взвешивалась и переносилась на диск. Далее с помощью лабораторного трансформатора постепенно с повышением подавалось напряжение на УШМ, и диск приво-

дился в движение. Линейная скорость вращения диска изменялась от 10 до 30 м/с. Температура, при которой происходило обледенение, изменялась от 0 до – 30 °С. Время обледенения изменялось от 10 до 20 минут. Изображения наледи на испытуемых образцах фиксировались с помощью скоростной видеосъемки камерой Evercam 2800с.



Рис. 2. Диск УШМ, используемый в эксперименте



Рис 3. Обледеневшие образцы в климатической трубе

Результаты

Проведенные эксперименты выявили закономерность, заключающуюся в том, что сила адгезии существенно зависит от формы льда и от температуры (рис. 4).

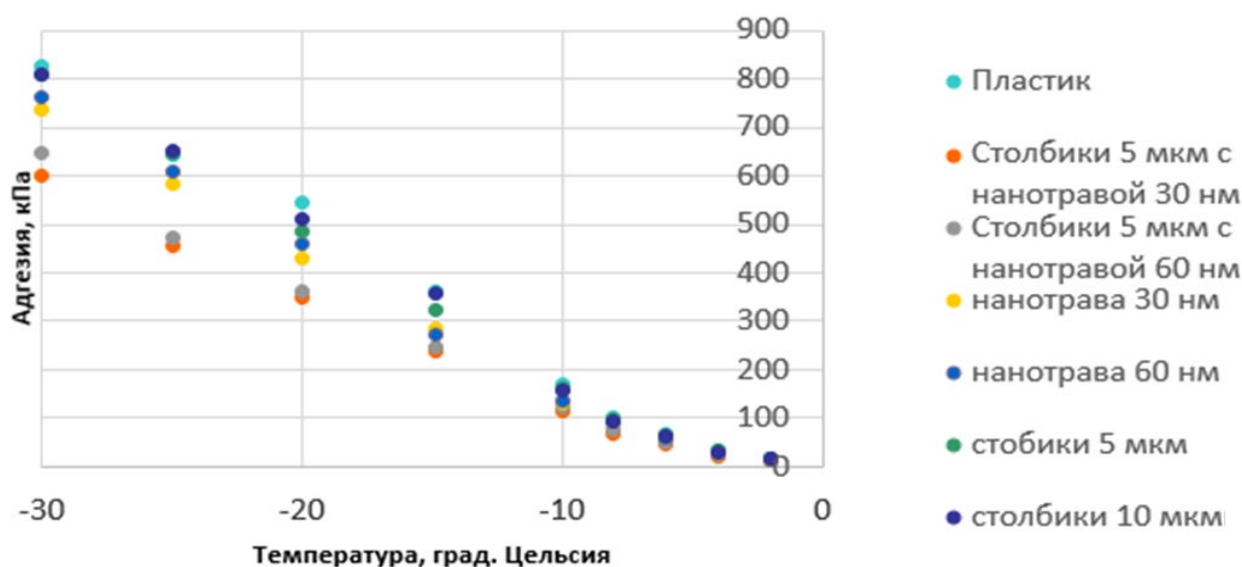


Рис 4. Температурная зависимость адгезии для различных структур поверхности

Таким образом, показано, что адгезия исследуемых покрытий и материала крыла имеет близкие значения, однако адгезия для покрытий в виде столбиков с нанотравой меньше на 25-30 %, чем для материала, из которого изготовлены элементы лопастей ветрогенераторов, что делает рассмотренные наноструктурированные покрытия перспективными для создания антиобледенительных систем.

Заключение

Получены результаты исследований по проверке уменьшения адгезии льда путем изменения оригинальной формы профиля лопасти и ее поверхности микроструктурами разной геометрии. Экспериментально показано, что сила адгезии существенно зависит от формы льда и от температуры. Экспериментально показано, что адгезия исследуемых покрытий и материала крыла имеет близкие значения, однако, адгезия для покрытий в виде столбиков с нанотравой меньше на 25-30 %, чем для материала, из которого изготовлены элементы лопастей ветрогенераторов, что делает их перспективными для антиобледенительных систем.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки противобледенительных систем и конструкций с пластиковыми полимерными покрытиями, например, для лопастей ветрогенераторов, защитных пластиковых элементов мостов, нефтяных платформ и пр. Однако, необходимо дальнейшее их изучение для выбора оптимальных параметров микроструктур, обеспечивающих максимальную защиту от обледенения и износостойкость покрытия.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wei, K.; Yang, Y.; Zuo, H.; Zhong, D. A review on ice detection technology and ice elimination technology for wind turbine. *Wind Energy* 2020, 23, 433–457.
2. Telecka, A.; Murthy, S.; Schneider, L.; Pranov, H.; Taboryski, R. Superhydrophobic properties of nanotextured polypropylene foils fabricated by roll-to-roll extrusion coating. *ACS Macro Lett.* 2016, 5, 1034–1038.
3. Okulova, N. Industrial-Scale Pattern Transfer Using Roll-to-Roll Extrusion Coating: Understanding the Process and Exploring its Applications, PhD thesis – Technical University of Denmark, 2018.
4. Kabardin I.K., Meledin V.G., Dvoynishnikov S.V., Stepanov K.I., Mukhin D.G., Zuev V.O., Gordienko M.R., Kakaulin S.V., Zezyulin I.V., Ledovsky V.E., Zubanov K.S. Features of using nanostructured plastic polymer coatings for protection against icing of industrial structures// *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2023. – Vol. 32, No. 1. – P. 54–61.

© С. В. Какаулин, И. К. Кабардин, М. Р. Гордиенко, К. С. Зубанов, 2024